

# **SIMULAÇÃO DO EFEITO DA CORROSÃO NA VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DE UMA TORRE METÁLICA DEGRADADA**

**SARA CRISTIANA CARNEIRO FERNANDES**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS**

---

Orientador: Professor Doutor Rui Carneiro de Barros

---

Coorientador: Mestre Fábio Moutinho Paiva

JUNHO DE 2018

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2017/2018**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais

*Conhecimento é Poder*

*Francis Bacon*

Simulação do efeito da corrosão na verificação da segurança estrutural de uma torre metálica degradada

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Rui Carneiro de Barros, que sempre esteve disponível para me ajudar em qualquer altura e pelo tempo passado a discutir ideias. Pela força, motivação e preocupação que me transmitiu ao longo deste semestre. Para não falar do detalhe e organização que me ensinou a fazer as coisas e pela sua compreensão à minha “trapalhice”.

Ao coorientador Fábio Moutinho Paiva, que sempre esteve disponível para me ajudar, e que me disponibilizou maior parte da minha documentação importante utilizada. Ajudou-me a resolver problemas que nunca resolveria tão rápido sem a sua ajuda.

À empresa Metalgalva e EDP, mais concretamente às pessoas dessas que perderam o seu tempo a responder a emails e que me forneceram o modelo que fez com a tese se concretizasse.

Não poderia também deixar passar a oportunidade de agradecer às pessoas que me acompanharam nestes 5 anos: aos meus pais e às minhas companheiras de Civil: Yi Li, Sónia Soares, Sofia Sampaio e Rita Martins.



## RESUMO

O objetivo do presente trabalho é abordar as principais patologias e ações que torres de transmissão metálicas estão sujeitas diariamente.

O principal fenómeno que gera patologias em torres metálicas é a corrosão.

A corrosão provoca uma perda de espessura na estrutura ao longo do tempo. A simulação desse fenómeno foi realizada de acordo com a classe de corrosividade atmosférica em questão, e seus parâmetros.

A ação condicionante envolvida no dimensionamento de torres metálicas é a ação do vento. Esta foi calculada pelas normas EN 1991-1-4 e EN 1993-3-1. O seu efeito dinâmico foi implementado pelo Método de Shinozuka.

A geometria inicial de uma torre padrão de referência sem efeitos de corrosão foi modelada pela empresa Metalogalva (Irmãos Silva, S.A.). O cálculo desta estrutura metálica (utilizada como exemplo demonstrativo) foi realizado com recurso ao programa “Autodesk Robot Structural Analysis 2018”, onde foram introduzidas as ações do vento calculadas.

No modelo utilizado, os montantes e travessas possuem um comportamento tipo reticulado e as diagonais um comportamento articulado. Face às elevadas cargas verticais e à esbelteza da estrutura, consideraram-se os efeitos de segunda ordem  $P-\Delta$ .

Os resultados dos esforços resistentes e de cálculo foram obtidos através do programa “Autodesk Robot Structural Analysis 2018”, e com eles é realizada a verificação dos membros estruturais da estrutura à encurvadura bem como a análise de fiabilidade dessas barras.

PALAVRAS-CHAVE: torres metálicas, inspeção, corrosão, classe de corrosividade, modelação, vento estático, vento dinâmico, análise não linear, capacidade resistente, encurvadura, fiabilidade





## **ABSTRACT**

The objective of the present work is characterizing the main pathologies and actions that metallic transmission towers are daily subjected.

The main phenomenon that generates pathologies in metal towers is corrosion.

Corrosion causes a loss of thickness over time. The simulation of this phenomenon was performed according to the corrosivity class, and its parameters.

The conditioning action involved in the design of metallic towers is the action of the wind.

This was calculated by EN 1991-1-4 and EN 1993-3-1. Its dynamic effect was implemented by the Shinozuka Method.

The initial geometry of a reference tower without corrosion effects was modelled by the company Metalogalva (Irmãos Silva S.A.). The structural analysis and metal calculations were performed using the “*Autodesk Robot Structural Analysis program 2018*”, where the calculated wind actions were also introduced. Several models were also made for different simulated thicknesses over time.

Several considerations in the model were discussed to get to the final decision of the calculation model. Considering the high vertical loads and the slenderness of structure, the second-order effects  $P-\Delta$  were also included.

The results of the generalized forces and displacements were calculated using the “*Autodesk Robot Structural Analysis 2018*” program, and with them a buckling member verification and reliability analysis were performed.

**KEYWORDS:** transmission tower, inspection, corrosion, corrosivity class, modelling, static wind, dynamic wind, non-linear analysis, resistance capacity, buckling, reliability



## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	I
RESUMO .....	III
ABSTRACT .....	V
<b>1 .INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1.ASPETOS GERAIS .....	1
1.2.OBJETIVO .....	2
1.3.DESCRICÃO DE CONTEÚDOS.....	2
<b>2 .DESCRICÃO GERAL DE TIPOLOGIAS DE TORRES METÁLICAS E POSTES DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>3</b>
2.1.DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA EM TORRES METÁLICAS.....	3
2.2.ELEMENTOS CONSTITUENTES DE UMA TORRE METÁLICA.....	4
2.3. TIPOS DE TORRES METÁLICAS E POSTES ELÉTRICOS EXISTENTES .....	5
2.4.CLASSIFICAÇÃO ENERGÉTICA DE TORRES METÁLICAS .....	9
<b>3 .PRINCIPAIS PATOLOGIAS DE TORRES METÁLICAS.....</b>	<b>11</b>
3.1.INTRODUÇÃO.....	11
3.2.CORROSÃO DEVIDO A HUMIDADE .....	11
3.3.CORROSÃO EM AÇO GALVANIZADO DEVIDO A POLUENTES ATMOSFÉRICOS .....	12
3.4.COMPORTAMENTO DO AÇO AO LONGO DO TEMPO.....	13
3.5.PARÂMETROS QUALITATIVOS DE RELATÓRIOS DE INSPEÇÕES QUE PODEM SER CONFIRMADOS POR APARELHOS ELETRÓNICOS (E OUTROS) .....	14
3.5.1. CORROSÃO ATMOSFÉRICA.....	14
3.5.1.1. Corrosão atmosférica devido a presença de humidade .....	14
3.5.1.2. Efeito do vento .....	16
3.5.1.3. Corrosão atmosférica devido à presença de poluentes.....	16
3.5.1.4. Verificação Corrosividade atmosférica – ISO 9223 .....	18
3.5.1.5. Classificação da corrosividade atmosférica pelo laboratório, norma IEC 60815.....	21
3.5.2. CORROSIVIDADE DO SOLO .....	23
<b>3.6.INSPEÇÃO DO REVESTIMENTO .....</b>	<b>24</b>
3.6.1. RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE.....	24

3.6.2. EMPOLAMENTO .....	25
3.6.3. GIZAMENTO -CLASSIFICAÇÃO, ISO 4628-6 .....	26
3.6.4. DESCAMAÇÃO .....	28
3.6.4.1. Ensaio de corte em X – teste de aderência destrutivo <i>ASTM D 3359 Método A</i> .....	29
3.6.5. POROSIDADE .....	30
3.6.6. TIPOS DE CORROSÃO .....	30
3.6.6.1. Corrosão tipo “ <i>Rusting</i> ” .....	32
3.6.6.2 Corrosão “ <i>Pitting</i> ” .....	32
3.6.7. FISSURAÇÃO .....	33
3.6.7.1. Detecção de falhas e descontinuidades com o teste ultra-som.....	35
<b>3.7.INSPEÇÃO ESTRUTURAL .....</b>	<b>35</b>
3.7.1. GRAU DE CORROSÃO PELA ESPESSURA PERDIDA .....	35
<b>3.8.PONDERAÇÃO DOS VÁRIOS PARÂMETROS NA INSPEÇÃO DO REVESTIMENTO .....</b>	<b>36</b>
<b>3.9.TRABALHO DE CAMPO.....</b>	<b>37</b>
3.9.1. FOTOGRAFIAS GERAIS .....	37
3.9.1.1. Relatório de inspeções do revestimento .....	39
3.9.1.2. Determinação da classe de corrosão atmosférica .....	39
<b>3.10. SIMULAÇÃO NÚMERICA DA PERDA DE ESPESSURA .....</b>	<b>40</b>
3.10.1. RESULTADO DA PERDA DE ESPESSURA EM FUNÇÃO DO TEMPO (EM ANOS) .....	41
<b>4 .REVISÃO DOS EC1-1-4 E EC3 3-1 E DO MÉTODO SHINOZUKA NO CONTEXTO DE TORRES METÁLICAS .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1.CASOS DE CARGA .....</b>	<b>43</b>
<b>4.2.HIPERESTATICIDADE .....</b>	<b>44</b>
<b>4.3. CÁLCULO DO VENTO PELO EC 1-1-4.....</b>	<b>46</b>
4.3.1. CÁLCULO <i>cscd</i> (COEFICIENTE ESTRUTURAL) [SECÇÃO 6.3(1)]: .....	46
4.3.2. CÁLCULO DO COEFICIENTE DE FORÇA <i>cf</i> [SECÇÃO 7.11].....	50
4.3.3. CÁLCULO DO COEFICIENTE PRESSÃO DINÂMICA DE PICO <i>qp(z)</i> [SECÇÃO 4.5(1)]:.....	52
<b>4.4. MÉTODO DE SHINOZUKA.....</b>	<b>53</b>
<b>4.5. EFEITO DE RAJADA .....</b>	<b>54</b>
<b>4.6.ANÁLISE ESTÁTICA LINEAR E ANÁLISE ESTÁTICA NÃO LINEAR .....</b>	<b>54</b>
<b>4.7.ANÁLISE MODAL .....</b>	<b>56</b>

<b>4.8. ANÁLISE TEMPORAL .....</b>	<b>57</b>
<b>4.9. VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA .....</b>	<b>58</b>
4.9.1. CLASSIFICAÇÃO DA SECÇÃO -EN1993-3-1 .....	58
4.9.2. FLEXÃO COM ESFORÇO TRANSVERSO .....	59
4.9.3. FLEXÃO COM ESFORÇO AXIAL .....	59
<b>4.10. ANÁLISE DE FIABILIDADE.....</b>	<b>61</b>
4.10.1. FUNÇÕES DE PROBABILIDADE .....	61
4.10.2. FUNÇÃO DE ESTADO LIMITE (G) .....	61
4.10.2.1. Índice de fiabilidade( $\beta$ ) .....	62
<b>5 .MODELAÇÃO DA TORRE METÁLICA EM ESTUDO .....</b>	<b>65</b>
<b>5.1.INTRODUÇÃO.....</b>	<b>65</b>
<b>5.2. CONSIDERAÇÕES REALIZADAS .....</b>	<b>66</b>
<b>5.3.HIPERESTATICIDADE.....</b>	<b>66</b>
<b>5.4.PROPRIEDADES DA ESTRUTURA ORIGINAL .....</b>	<b>67</b>
<b>5.5. FORÇAS .....</b>	<b>68</b>
5.5.1. PESO PRÓPRIO E SOBRECARGAS .....	68
5.5.2. FORÇA DO VENTO .....	69
<b>5.6.CENÁRIOS DE CORROSÃO .....</b>	<b>71</b>
<b>5.7. ANÁLISE MODAL .....</b>	<b>72</b>
<b>5.8.ANÁLISE TEMPORAL .....</b>	<b>73</b>
<b>5.9. ANÁLISE DE ENCURVADURA .....</b>	<b>75</b>
5.9.1. Efeito de continuidade após as barras não verificarem .....	75
5.9.2. Tipos de modelos .....	76
5.9.2.1. Modelo com montantes articulados e diagonais e travessas reticulados .....	76
5.9.2.2 Modelo todas as barras articuladas .....	76
5.9.2.3. Modelo com montantes reticulados e diagonais e travessas articulados .....	76
5.9.2.4. Modelo com todas as barras reticuladas .....	77
5.9.2.5. Modelo com travessas e montantes reticulados e diagonais articulados .....	77
5.9.2.5.1. Efeito da não linearidade das forças.....	79
5.9.3. Perda da capacidade resistente em função da espessura perdida .....	81
<b>5.10. ANÁLISE DE FIABILIDADE.....</b>	<b>86</b>

<b>6 .CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>89</b>
<b>6.1.CONCLUSÕES.....</b>	<b>89</b>
<b>6.2.RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>89</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2

Figura 2.1- Sistema de produção e transporte de energia elétrica - [1] .....	4
Figura 2.2 - Esquema básico de uma torre metálica e seus principais componentes - [1] .....	4
Figura 2.3-Designação dos membros estruturais da torre - [2] .....	5
Figura 2.4 - Torre auto – portante - [3].....	6
Figura 2.5-Torre espiada - [3].....	7
Figura 2.6-Torre de suspensão - [3].....	8
Figura 2.7-Configurações de torres metálicas e postes de alta tensão - [1] .....	9
Figura 2.8-Gamas de potencial para diferentes tipos de torres - [4].....	10

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1- Reações inerentes ao processo de corrosão - [6].....	12
Figura 3.2- Superfície de aço galvanizado para diferentes períodos de corrosão, (a) 48 h, (b)84 h, (c) 132 h, (d) 180 h e (e) 228 h - [7] .....	13
Figura 3.3-Curvas de polarização do aço galvanizado após diferentes tempos de corrosão, (a) 48 h, (b)84 h, (c) 132 h, (d) 180 h e (e) 228 h - [7].....	13
Figura 3.4-Área corroída por corrosão uniforme - [5].....	15
Figura 3.5-Corrosão em juntas - [9] .....	15
Figura 3.6-Reação de Corrosão galvânica - [9] .....	15
Figura 3.7-Rácio de corrosão em função de pH - [11].....	16
Figura 3.8-Classes de corrosão atmosférica - [12] .....	17
Figura 3.9-Processo para recolha de amostra de pH e cloretos - [14] .....	18
Figura 3.10-Kit usado para medição de cloretos e pH- [14] .....	19
Figura 3.11-Processo de recolha de amostra para análise- norma IEC 60815 - [15] .....	21
Figura 3.12-fator b em função da temperatura - [15] .....	21
Figura 3.13-Pesagem dos poluentes .....	22
Figura 3.14 - Classe de poluição natural ou categoria de corrosividade atmosférica – norma IEC 60815 .....	23
Figura 3.15-a) Aspreza baixa b), Aspreza moderada, c), Aspreza alta, d) Aspreza muito elevada(Barragan, 2016) - [14] .....	24
Figura 3.16-Densidade de empolamento - [16].....	25
Figura 3.17-Efeito de gizamento - [8].....	26
Figura 3.18- Classificação, ISO 4628-6 - [8] .....	27
Figura 3.19-Processo que origina a descamação-[15] .....	28

Figura 3.20-Caso de perda de aderência - [16] .....	29
Figura 3.21-Realização de um corte em X - [8].....	29
Figura 3.22-Classificação ASTM D 3359 Método A- [8].....	29
Figura 3.23-Exemplo de porosidade - [8] .....	30
Figura 3.24-Causas dos graus de corrosão por intempéries - [17].....	30
Figura 3.25-Graus de intempérie A,B,C,D - [17] .....	31
Figura 3.26-Nível de “ <i>Rusting</i> ”-, Classificação, ISO 4628-3 [16] e ASTM D 610 [8] .....	32
Figura 3.27-Interpretação iônica da corrosão por pontos - [9].....	32
Figura 3.28-classificação de ASTM G46 (ASTM 2013c) - [14] e [9] .....	33
Figura 3.29- Fissuração descontrolada [16] .....	34
Figura 3.30-Fissuração ortogonal-[16] .....	34
Figura 3.31-Tipos de resultados teste ultra som - [10].....	35
Figura 3.32- medidor de Espessura de Película Seca .....	35
Figura 3.33-barras partidas - [9] .....	36
Figura 3.34-Vista geral da secção corroída.....	37
Figura 3.35-Estados dos elementos da torre .....	38
Figura 3.36-Exemplos de corrosão .....	38
Figura 3.37-Resultados da análise de cloretos e pH .....	39
Figura 3.38-Perda de espessura em função do tempo da estrutura em anos .....	41

#### **CAPÍTULO 4**

Figura 4.1-Construção do “ <i>esqueleto</i> ” de uma estrutura .....	44
Figura 4.2-Troço de 6 graus de liberdade .....	45
Figura 4.3-Definição $Agk$ , $li$ , $bi$ , $l$ , $b$ segundo EC1-1-4 [Secção 7.11(2)] .....	51
Figura 4.4-Coeficiente de força $cf$ , 0 para estruturas treliçadas constituídas por elementos de secção transversal circular -EN1991-1-4 , $Re$ (número de Reynolds)= $2 * qpp$ .....	51
Figura 4.5-Valores indicativos do coeficiente de efeitos de extremidade $\psi$ $\lambda$ em função do índice de cheios $\phi$ e da esbelteza $\lambda$ .....	52
Figura 4.6- Função de densidade espectral de potência $SL(fL)$ .....	53
Figura 4.7- Análise elástica e análise estática não linear .....	54
Figura 4.8-Efeitos P- $\Delta$ e P- $\delta$ - [28] .....	55
Figura 4.9- Matriz de rigidez elástica ( $ke$ ) e Matriz de rigidez geométrica ( $kg$ ) - [28].....	55
Figura 4.10-Classificação de secções transversais de acordo com o EC3 parte 3 .....	58
Figura 4.11-Classificação de secções tubulares e cantoneiras .....	58
Figura 4.12-comprimentos de encurvadura para barras articuladas (1) e barras reticuladas (2) .....	60



Figura 4.13-Função de probabilidade e sua cumulativa para uma distribuição normal - [5] .....	61
Figura 4.14-Base dos métodos probabilísticos em estruturas - [34].....	62

## **CAPÍTULO 5**

Figura 5.1-Processo de modelação de um FEM - [37] .....	65
Figura 5.2-Elementos estruturais de uma torre metálica .....	66
Figura 5.3-Curva de otimização - [39].....	68
Figura 5.4-Definição do ângulo de ataque - [40].....	69
Figura 5.5- Divisão em altura da análise da torre .....	69
Figura 5.6-Configurações dos modos de vibração .....	72
Figura 5.7-velocidade do vento turbulento $u(t)$ para altura de 0 m,30 e 50 m, e uma velocidade base de 28m/s e $z_0=0.01$ , duração 600 segundos - [24].....	74
Figura 5.8-Deslocamento no topo devido á carga do vento estática e dinâmica mais estática em função da espessura perdida .....	75
Figura 5.9-Distribuição das cargas da escada .....	77
Figura 5.10-Deslocamento no topo da estrutura em função da espessura perdida na estrutura .....	80
Figura 5.11-Relação entre a perda de $N_{rd}$ e a perda de espessura[mm] para os vários tipos de barras .....	82
Figura 5.12-Relação entre a diferença de $N_{rd}$ e $N_{ed}$ e a perda de espessura em [mm] .....	83
Figura 5.13- Relação entre a Divisão de $N_{ed}$ e $N_{rd}$ e a perda de espessura em [mm] .....	85
Figura 5.14-Índice de fiabilidade para montantes, diagonais e travessas .....	86

## **ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)**

### **CAPÍTULO 3**

Quadro 3.1- Determinação do ponto de orvalho - [8].....	14
Quadro 3.2-Classes de corrosão atmosférica - [13].....	17
Quadro 3.3- Tempo de humidade pela ISO 9223 (ISO 2012b) - [14] .....	18
Quadro 3.4- Categorias de sulfatos pela ISO 9223 (ISO 2012b) -[14] .....	19
Quadro 3.5-Categoria de cloretos pela ISO 9223 (ISO 2012b) - [14] .....	19
Quadro 3.6-Categorias de corrosão pela ISO 9223 (ISO 2012b) -[14].....	20
Quadro 3.7- Empolamento - ISO 4628/2 e ASTM D 714 - [8].....	26
Quadro 3.8- Grau de descamação – “Flaking” ISO 4628/2 e ASTM D 661 - [8].....	28
Quadro 3.9- Graus de fissuração (“Cracking”) - ISO 4268/4 <>ASTM D660- [8] .....	33
Quadro 3.10-Pesos (ponderações) dos parâmetros de inspeção .....	36
Quadro 3.11 - Resultados de campo.....	39
Quadro 3.12-Concentração de cloreto de acordo com Liesegan, para diferentes tipos de ambientes - [18].....	40
Quadro 3.13-Concentração de $SO_2$ em ( $\mu g/m^3$ ) em diferentes tipos de ambientes- [19] .....	40

### **CAPÍTULO 4**

Quadro 4.1- Classes de fiabilidade EN1993-3-1 .....	43
Quadro 4.2- Fatores de segurança parcial EN 1993-3-1 .....	44
Quadro 4.3- Categoria de terreno Secção 4.3.2 .....	47
Quadro 4.4- Fator de imperfeição .....	59
Quadro 4.5 - Parâmetros estatísticos das cargas aplicadas - [35] .....	62
Quadro 4.6 - Parâmetros estatísticos da resistência do membro - [36].....	62

### **CAPÍTULO 5**

Quadro 5.1- Propriedades das barras .....	67
Quadro 5.2-Parâmetros da ação do vento para a altura de referência.....	70
Quadro 5.3- Resultados finais e parcelares da força do vento .....	71
Quadro 5.4- Resultados da análise modal, frequências naturais e massa modal .....	73
Quadro 5.5– Resultado da verificação da análise de encurvadura .....	78
Quadro 5.6- Tipos de barras que não verificaram a segurança e variação dos esforços na análise linear e não linear para a situação inicial (0% perda de espessura).....	79
Quadro 5.7-Variação o esforço axial de cálculo consoante a perda de espessura nos vários tipos de elementos da torre.....	80

## SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

### Letras do alfabeto

A - área de secção transversal

$A_{ref}$  - área de referência

$b$  - largura da construção

$B^2$  - coeficiente de resposta quase-estática

C - matriz de amortecimento

$C_\theta$  - condutividade

$c_f$  - coeficiente de força

$c_0$  - coeficiente orográfico

$c_{prob}$  - coeficiente de probabilidade

$c_r$  - coeficiente de rugosidade

$c_s, c_d$  - coeficiente estrutural

CD - rácio de deposição de Cloreto

DDNS - densidade de depósito de não-solúveis

DDSE - densidade de depósito de sal equivalente

FEM - modelo de elementos finitos

$f(x)$  - função de probabilidade

$f_L(z, n1x)$  - Frequência adimensional

$f_{yd}$  - tensão de cedência

$F_w$  - força do vento

G(R,Q) -função de estado limite último

$G_K$  - cargas permanentes

$h$ - altura da construção

$I_v$  - intensidade da turbulência

K - matriz de rigidez

kI - coeficiente de turbulência

$k_p$  - fator de pico

$k_r$  - coeficiente de terreno

$k_e$  - matriz de rigidez elástica

$k_g$  - matriz de rigidez geométrica

$l_e$  - comprimento de encurvadura

$L_t$  - escala de referência

$L(z_s)$  - escala de turbulência

M - matriz de massa diagonal

$m_e$  - massa equivalente

$M_{sd}$  - momento flector atuante

$n_{1,x}$  - frequência fundamental

$N_{sd}$  - esforço axial atuante

$Q_k$  - ações variáveis

$q_p(z)$  - coeficiente Pressão dinâmica de pico

$R^2$  - coeficiente de resposta em ressonância

$R_h$  - função de admitância aerodinâmica

$R_b$  - função de admitância aerodinâmica

$R(t)$  - vetor do carregamento imposto

$R_e$  - número de Reynolds

$S_{L(z_s, n_{1,x})}$  - função de densidade espectral de potência adimensional

SD - rácio de deposição de SO<sub>2</sub>

TOW-tempo de humidade

$u(t)$  – velocidade turbulenta do vento

$u$  - vetor de deslocamento

$\dot{u}$  - vetor velocidade

$\ddot{u}$  - vetor aceleração

$U(z)$  - velocidade média do vento

V-variância

$v_b$  - velocidade de base do vento

$v_{b,0}$  - velocidade de referência do vento

$v_m(z)$ - velocidade média do vento

$V_{sd}$  - esforço transversal

$w_{el}$  - módulo de flexão elástico da secção transversal

$z_0$  - comprimento de rugosidade

$z_{min}$  - altura mínima

$z_s$  - altura de referência

$z_t$  - altura de referência

## **Letras gregas**

$\vartheta$  - Temperatura da solução

$v$  - frequência de passagens ascendentes

$\sigma$  - desvio padrão

$\sigma^2$  - variância

$\mu$  - média

$\beta$  - índice de fiabilidade

$T$  - duração de integração da velocidade

$\delta$  - Decremento logarítmico total de amortecimento

$\delta_s$  - decremento logarítmico de amortecimento estrutural

$\delta_a$  - decremento logarítmico de amortecimento aerodinâmico

$\delta_d$  - decremento logarítmico de amortecimento devido a dispositivos especiais

$\rho$  - densidade do ar

$\psi\lambda$  - coeficiente de efeitos de extremidade

$\Phi$  - índice de cheios

$\Phi$  - é a forma da deformada

$W$  - é a frequência de vibração natural da estrutura

$\gamma_{m0}$  - coeficiente de segurança parcial

$\gamma_{m1}$  - coeficiente de segurança parcial

$\chi$  - fator de redução para o modo de encurvadura

$\bar{\lambda}$  - coeficiente de esbelteza adimensional

$\lambda$  - coeficiente de esbelteza

$\lambda_b$  – fator bias

$\alpha$  - fator de imperfeição



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1.ASPETOS GERAIS

O bom funcionamento das linhas de alta tensão está diretamente relacionado com a capacidade do seu suporte, a torre, que irá ser o grande foco desta dissertação.

As torres metálicas todos os dias enfrentam dificuldades como:

- O facto de a maior parte deste tipo de estruturas, terem sido construídas na década de 50 e 60, o que quer dizer que já estão há mais de 50 anos ativas e precisam de assim continuar;
- O aumento da necessidade destes recursos, derivado da evolução da população e tecnologia, sendo necessário aumentar o número destas infra-estruturas;
- O licenciamento destas construções, demorado e nada fácil de obter, pode resultar numa incapacidade de satisfazer as necessidades permanentes.

O efeito das condições ambiental sobre torres metálicas e o seu envelhecimento, comprometem a segurança e o desempenho destas.

O aço é um dos materiais mais aplicados na construção, nomeadamente é usado para a edificação de torres metálicas. Assim, apesar de já ser tecnicamente conhecido um dos maiores efeitos causadores de desastres ou colapsos de torres construídas com este material – o vento – torna-se agora pertinente também procurar perceber as consequências da corrosão em torres metálicas construídas na segunda metade do século XX, sem qualquer proteção contra este efeito.

Grandes corrosões podem ocorrer quando a superfície do aço não está protegida e é atacada por água ou por meio industrialmente agressivo. Daí surge o facto de a tese abordar torres metálicas antigas.

De acordo com estudos recentes já é possível simular a corrosão ocorrida ao longo do tempo, através da informação de parâmetros poluentes como: teor de cloro e sulfatos, humidade e temperatura.

## **1.2.OBJETIVO**

O principal objetivo deste trabalho é modelar o fenómeno da corrosão numa torre de referência, demonstrando como a capacidade estrutural diminui e a deformação aumenta.

Para além da variação da capacidade resistente de elementos estruturais seleccionados ao longo do tempo (como consequência da perda temporal de espessuras), também se aborda a evolução da sua fiabilidade.

## **1.3.DESCRICÃO DE CONTEÚDOS**

O capítulo 2 abrange meramente a descrição dos vários tipos de torres existentes e sua localização, consoante o risco e gama de potencial.

No terceiro capítulo relaciona-se os vários tipos de corrosão industrial, urbana, marinha, com o seu fenómeno químico. Para além disso é apresentado o seu efeito visual real. Dessas observações foi elaborada uma proposta de relatório de inspeções de acordo com a importância dos vários fenómenos.

Ainda neste capítulo é demonstrada a modelação do efeito da corrosão, o qual é representado por uma perda de espessura ao longo dos anos.

Já no capítulo 4, é explicado o processo de modelação da ação do vento estático e dinâmico. O efeito da não linearidade das cargas verticais é também enunciado, assim como as respetivas verificações à encurvadura das barras. São ainda abordados de maneira simplificada os aspetos principais de determinação da fiabilidade de membros estruturais e da estrutura.

O capítulo 5 apresenta os resultados das modelações descritas nos outros capítulos, os resultados da força do vento e seus parâmetros, assim como as barras que não verificaram os estados limites últimos de encurvadura ao longo do tempo, usando a combinação de cargas (peso próprio + sobrecargas + vento).

As especificações de materiais, parâmetros de resistência e parâmetros de carga foram projetados usando técnicas de fiabilidade estrutural. Os índices de fiabilidade foram calculados para medir o desempenho da estrutura.

Finalmente no capítulo 6 abordam-se algumas conclusões deste trabalho bem como sugestões para possíveis suas extensões em trabalhos futuros.



## 2

### **DESCRIÇÃO GERAL DE TIPOLOGIAS DE TORRES METÁLICAS E POSTES DE ALTA TENSÃO**

As torres metálicas e postes de alta tensão asseguram a transmissão de energia elétrica. Nesse âmbito, começa-se este capítulo com uma descrição geral desse processo.

Estes tipos de infra-estruturas podem exibir vários tipos de tipologias, secções, alturas e gamas de potencial elétrico; aspetos que serão apresentados ao longo deste capítulo.

#### **2.1.DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA EM TORRES METÁLICAS**

A transmissão de energia parte da estação ou unidade geradora, requerendo um transformador para aumentar a tensão e reduzir a corrente. No exemplo gráficamente representado na Figura 2.1, a tensão é aumentada para 500 KV e transmitida para uma subestação por meio de linhas de alta tensão.

Numa subestação localizada no centro de uma cidade, a tensão é reduzida para 220KV e distribuída por linhas de alta tensão a subestações de alta voltagem localizadas no interior das cidades. Neste local a tensão é novamente reduzida , para 69 KV. Posteriormente a energia é transmitida a outras subestações locais, reduzindo cada vez mais a tensão.

Em áreas congestionadas localizadas dentro das cidades, os cabos subterrâneos são usados para a transmissão de energia elétrica. O sistema de transmissão subterrânea é ambientalmente preferível, mas tem um custo significativamente maior.

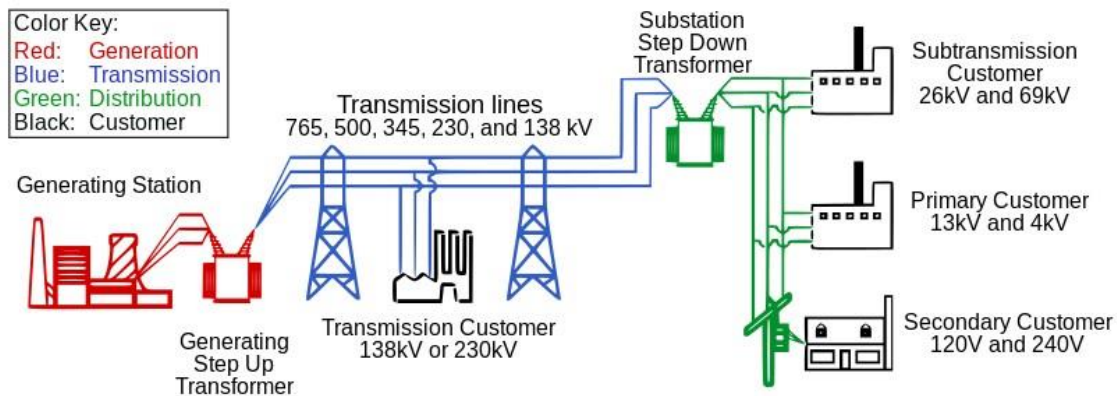


Figura 2.1- Sistema de produção e transporte de energia elétrica - [1]

## 2.2.ELEMENTOS CONSTITUINTES DE UMA TORRE METÁLICA

O corpo da torre é um elemento essencial das torres metálicas, pois suporta o peso proveniente dos cabos. Além disso, é responsável por manter uma ligação às fundações e por manter uma folga entre os condutores.

A Figura 2.2 apresenta os elementos constituintes de uma torre metálica: a torre portante propriamente dita, o condutor que costuma ser de alumínio ou aço reforçado, a fundação e o fio de terra que protege os condutores do relâmpago.

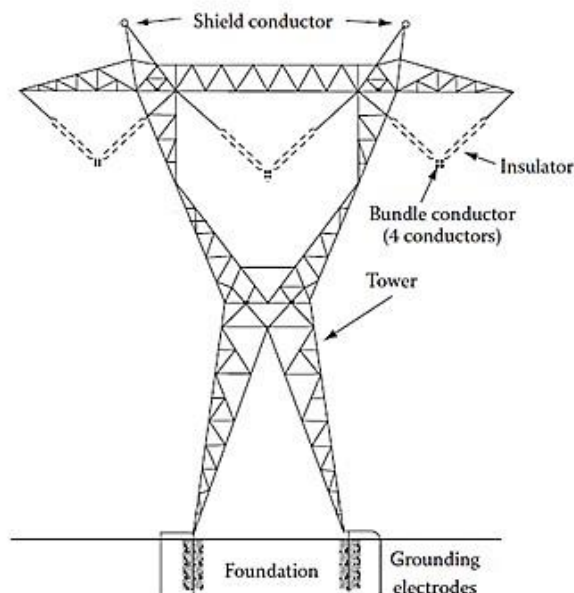


Figura 2.2 - Esquema básico de uma torre metálica e seus principais componentes - [1]

Ao longo deste trabalho vamos citar alguns termos relacionados com a designação estrutural dos membros da torre, conforme detalhados na Figura 2.3:

- Braços cruzados (“*Cross Arm*”) são dos principais componentes da linha de transmissão, suportando os condutores de energia. O número de “*Cross Arms*” depende do número de circuitos das linhas de transmissão;
- O troço principal vertical de qualquer torre metálica é designado de gaiola (“*Cage*”);
- O corpo da torre, (“*Tower Body*”) é o troço da torre existente entre as fundações e a gaiola;
- O cume ou cimo (“*Peak*”) é o troço da torre acima dos braços cruzados.

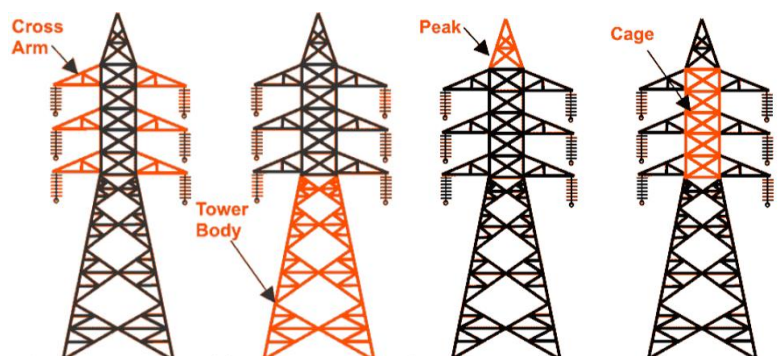


Figura 2.3-Designação dos membros estruturais da torre - [2]

### 2.3. TIPOS DE TORRES METÁLICAS E POSTES ELÉTRICOS EXISTENTES

Os materiais constituintes das torres podem ser madeira, aço, betão, alumínio e plásticos reforçados.

A caracterização destes suportes é realizada em função da linha, de acordo com a complexidade dos circuitos, tensão na linha de transmissão e características estruturais (formatos, materiais, comportamento estrutural).

Relativamente ao objetivo principal a abordar, o efeito da corrosão no comportamento estrutural, o desempenho dos vários tipos de formatos de torres e postes não é completamente igual.

As torres designadas como “Auto-portantes”, como a origem do nome refere, são suportadas pelo solo ou em alguns casos por edifícios. Embora o peso dessas torres seja maior que os outros tipos de torres, elas exigem menos área de base e são adequados em muitas situações, como em torres de TV, MW, e torres iluminação em estádios desportivos.

A rigidez à torção também é um parâmetro a favor destas torres, o que é importante para um bom funcionamento das linhas.

Em termos de preço são mais caras que as torres espiadas (“*Guyed Towers*”), mas compensam em algumas situações, como por exemplo para combater ventos muito fortes em grande altura.

As torres auto-suportadas podem variar entre 10 a 200 metros; podem ser de secção quadrada, de secção triangular (que irá ser o caso de estudo) e secção circular.



Figura 2.4 - Torre auto – portante - [3]

As torres espiadas (“*Guyed*”) são muito mais leves do que as “Auto-suportadas”, mas requerem um grande espaço livre para ancorar os cabos que apoiam a torre à fundação. Nesse caso, apenas quando há grande espaço em aberto, podem ser empregadas torres espiadas.

O deslocamento lateral destas torres costuma ser maior que as auto-suportadas.

Para alturas mais elevadas (100 metros ou mais), é muito mais barato construir uma torre espiada. Um número significativo de torres de rádio e televisão (torres de telecomunicações) são torres espiadas.



Figura 2.5-Torre espiada - [3]

As torres de transmissão, assegurando a suspensão de cabos de transmissão de energia, oferecem maior flexibilidade e são frequentemente usadas em condições de elevadas cargas suspensas.

Estes torres para além de poderem ser somente de aço também podem ser de aço galvanizado.

Para linhas de transmissão com tensão de 100 kV ou superior, o uso de estruturas em treliça de aço quase sempre é considerado vantajoso porque são:

- Facilmente adaptáveis a qualquer forma ou altura da torre;
- Facilmente divisíveis em secções adequadas para transporte e montagem;
- Fáceis de reparar, reforçar e ampliar;
- Duráveis quando corretamente protegidas contra a corrosão.



Figura 2.6-Torre de suspensão - [3]

Ainda dentro das subcategorias anteriores as estruturas podem ter várias configurações: horizontal, vertical e delta, são as mais comuns (Figura 2.7).

As estruturas H-Frame são as mais fracas para suportar cargas longitudinais, já as outras torres são melhores para suportar e transmitir este tipo de cargas, podendo ser projetadas para qualquer orientação de carga.

No que diz respeito a torres espiadas em triângulo invertido, em consequência do seu formato, ao nível da base a situação pode ser comprometedora, devendo-se ter cuidado especial na verificação das ancoragens durante a construção.

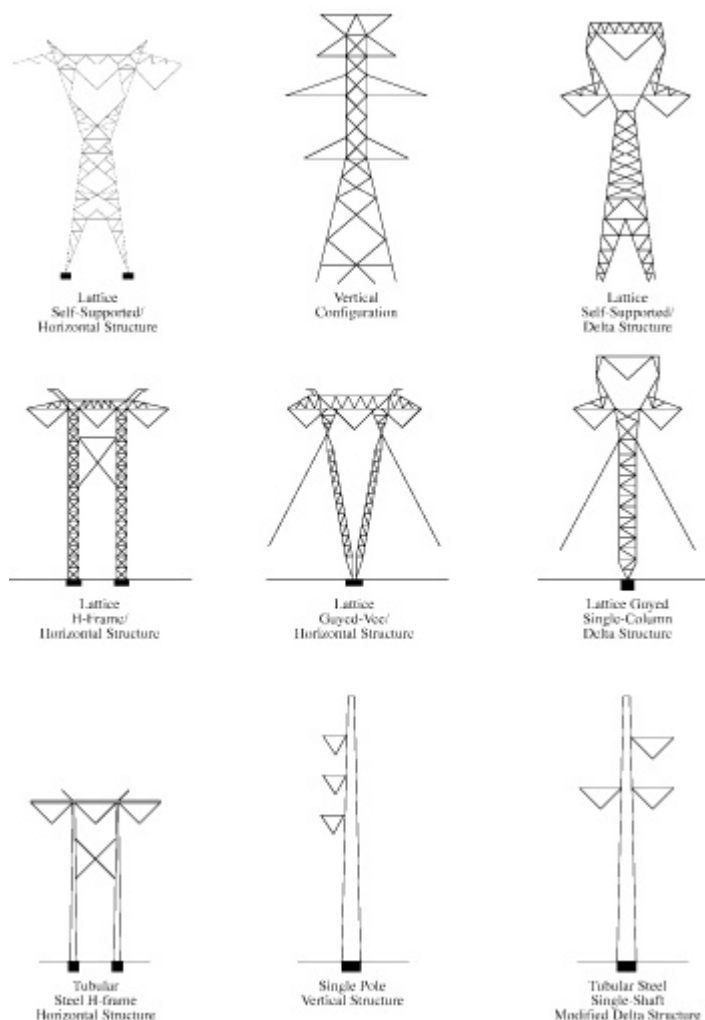


Figura 2.7-Configurações de torres metálicas e postes de alta tensão - [1]

## 2.4.CLASSIFICAÇÃO ENERGÉTICA DE TORRES METÁLICAS

A classificação energética de linhas de alta tensão é definida de acordo com os seguintes intervalos [1]:

- Baixa tensão (linha de distribuição secundária) – menos de 1 kV, utilizadas para a ligação entre um cliente comercial ou residencial pequeno e a utilidade.
- Média tensão (linha de distribuição primária) – entre 1 kV e cerca de 33 kV, utilizadas para distribuição em áreas urbanas e rurais.
- Alta tensão – entre 33 kV e cerca de 230 kV, utilizadas para Subtransmissão entre 33-115 KV e transmissão para tensões maiores que 115 KV.
- Alta tensão extra (Transmissão) – mais de 230 kV, até cerca de 800 kV.
- Ultra-alta tensão – superior a 800 kV (existe em países como a Índia e China).

Como vemos na acima Figura 2.8, os vários tipos de torres estão ligados a várias gamas de potencial elétrico transmitido. Assim postes elétricos adequam-se a potências mais baixos, torres de suspensão a potências intermédias e torres espiadas com configuração horizontal a potências maiores.

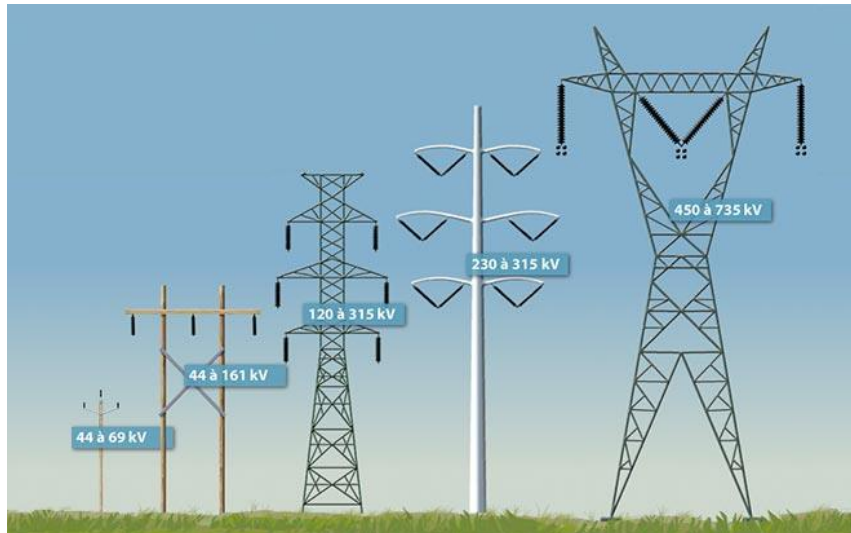


Figura 2.8-Gamas de potencial para diferentes tipos de torres - [4]



# 3

## PRINCIPAIS PATOLOGIAS DE TORRES METÁLICAS

### 3.1. INTRODUÇÃO

As principais patologias de torres metálicas estão associadas à humidade e poluição no local de implantação, as quais influenciam a fenomenologia da corrosão dos materiais constituintes.

A corrosão ocorre principalmente em condições ambientais desfavoráveis como: proximidade a ambientes marítimos, chuvas intensas, relâmpagos, gelo, poluição atmosférica devido a unidades industriais (fábricas, produção industrial de adubos, etc).

A humidade é um fator crucial que afeta a oxidação do zinco gradualmente, pois quanto maior a humidade, mais rápido é o processo de oxidação.

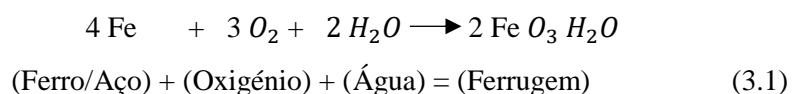
Outro fator condicional é a poluição de  $SO_2$  (dióxido de enxofre). A situação crítica ocorre principalmente nas zonas mais elevadas da torre, onde as velocidades do vento são altas e ocorre uma maior propagação de poluentes agressores. A velocidade elevada, pode contribuir para diminuir a camada protetora de zinco, quando transporte (por exemplo) de poeiras e areias, que irão desgastar camadas protetoras.

O tipo de corrosão que se está a desenvolver (generalizada ou localizada) irá ser importante na decisão do cenário de corrosão a adotar no último capítulo.

Quando temos uma corrosão derivada à poluição industrial ou marítima, a perda de espessura ao longo dos anos vai ocorrer (de um modo geral) na parte superior da torre. Já no caso de a corrosão ser devido a condições climáticas, por exemplo devido à chuva e à neve (que é o mais comum) a corrosão vai-se manifestar na base da torre.

### 3.2. CORROSÃO DEVIDO A HUMIDADE

A superfície do aço quando exposta à água, juntamente com a reação do aço com o oxigénio provoca corrosão da superfície (Equação (3.1) -[5])



### 3.3. CORROSÃO EM AÇO GALVANIZADO DEVIDO A POLUENTES ATMOSFÉRICOS

O revestimento galvanizado é a solução típica adotada contra a corrosão, protegendo durante 20 a 25 anos seções angulares e placas de suporte em ambientes não-agressivos.

Quando o aço é galvanizado a quente, a camada de liga zinco-ferro é fundida e a ligação metalúrgica entre o zinco e o ferro é mais forte à exposição do que o revestimento comum com tinta.

Mesmo quando este revestimento tem fissuras, o ânodo de zinco continuará a impedir a oxidação do aço, ao contrário do que acontece nos outros revestimentos.

O processo de corrosão da superfície de aço galvanizado é então o seguinte: na fase inicial, Zn combina-se com  $O_2$  no ar húmido para formar  $ZnO$  e  $Zn(OH)_2$ ; adsorvendo  $Cl^-$  e  $SO_4^{2-}$  juntamente com estes, formam os produtos de corrosão finais respetivos, que constitui a corrosão derivada dos sulfatos e dos cloretos.

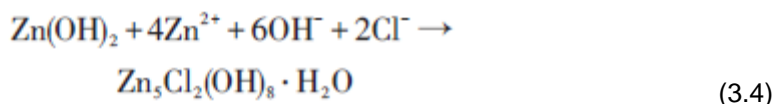
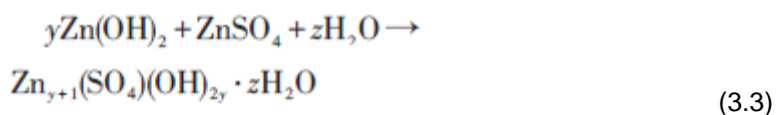
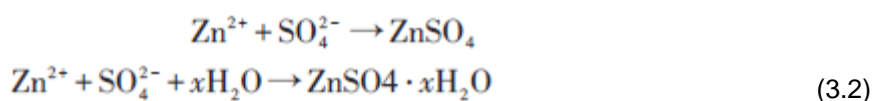


Figura 3.1- Reações inerentes ao processo de corrosão - [6]

De acordo com a Figura 3.1, os produtos de corrosão existentes nas diferentes “atmosfera” são:

Atmosfera marinha:  $Zn_5(OH)_8 Cl_2 + H_2O$  (3.4)

Atmosfera industrial:  $Zn_4 Cl_2 (OH)_4 SO_4 + 5H_2O$  (3.3)

Atmosfera urbana:  $Zn_4 SO_4 (OH)_6 + n^* H_2O$  (3.2)

### 3.4. COMPORTAMENTO DO AÇO AO LONGO DO TEMPO

Através de experiências eletroquímicas já realizados em estudos anteriores (acelerando o processo de corrosão) é possível prever o comportamento do aço ao longo do tempo (Figura 3.2).

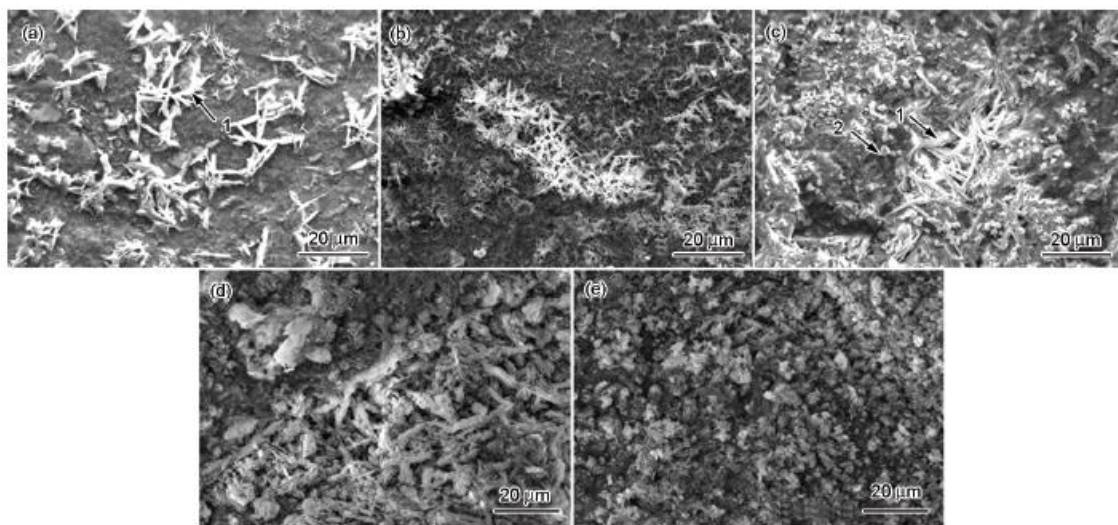


Figura 3.2- Superfície de aço galvanizado para diferentes períodos de corrosão, (a) 48 h, (b)84 h, (c) 132 h, (d) 180 h e (e) 228 h - [7]

Na fase inicial de corrosão, a superfície de aço galvanizado é formada por produtos em forma de coníferos (Figura 3.2 a e b). À medida que o tempo de corrosão se prolongava, o produto composto por formações coníferas aumenta, começando a cobrir o aço galvanizado à superfície. Continuando a aumentar o tempo de corrosão, inicia-se a formação de produtos em forma nodular (Figura 3.2 c). Os produtos nodulares continuaram a aumentar, o que por fim os transforma numa forma mais não-circular.

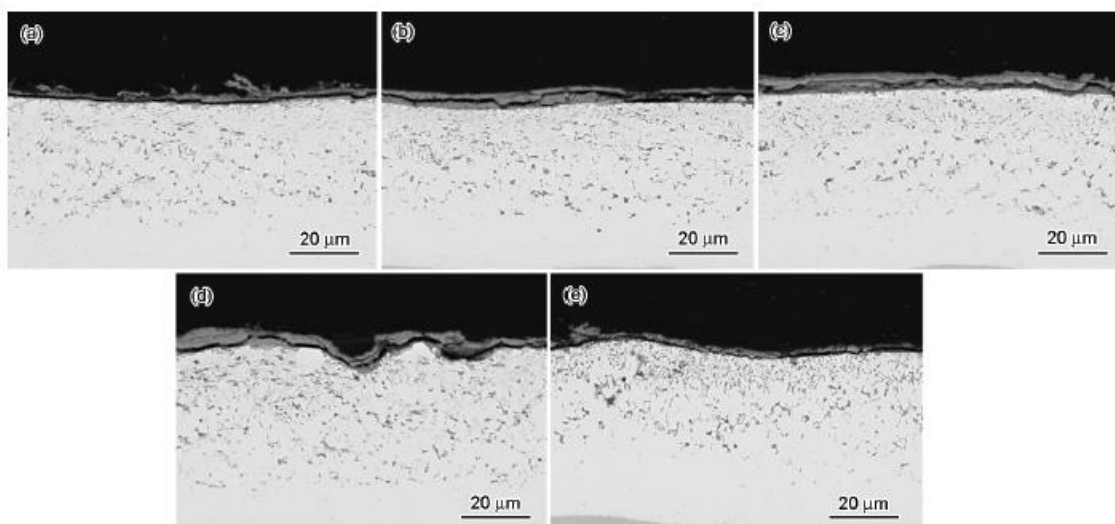


Figura 3.3-Curvas de polarização do aço galvanizado após diferentes tempos de corrosão, (a) 48 h, (b)84 h, (c) 132 h, (d) 180 h e (e) 228 h - [7]

Como podemos observar na Figura 3.3, a corrosão do aço galvanizado mudou ao longo do tempo. A espessura de corrosão aumenta até às 180 horas e começa a diminuir para as 228 horas.

Sendo assim a resistência do aço primeiramente aumenta gradualmente e depois diminui. Isto acontece porque a camada de ferrugem tem um certo efeito protetor, mas ao longo do tempo os produtos da corrosão conferem uma nova morfologia.

A presença de porosidade faz com que exista um menor desempenho na proteção.

### 3.5. PARÂMETROS QUALITATIVOS DE RELATÓRIOS DE INSPEÇÕES QUE PODEM SER CONFIRMADOS POR APARELHOS ELETRÔNICOS (E OUTROS)

#### 3.5.1. CORROSÃO ATMOSFÉRICA

Os fatores que de um modo geral influenciam a corrosão atmosférica são: a temperatura, humidade relativa, correntes de vento, impurezas sólidas, impurezas em suspensão, gases provenientes de processos de queima de combustíveis, entre outros possíveis contaminantes.

Estes factores são importantes para definir a corrosividade existente na atmosfera.

##### 3.5.1.1. Corrosão atmosférica devido a presença de humidade

Para evitar condensações na superfície, a temperatura deve estar 3°C, acima da temperatura de orvalho. Em geral a humidade relativa deve ser inferior a 85 % (Quadro 3.1).

Quadro 3.1- Determinação do ponto de orvalho - [8]

TABELA PARA DETERMINAÇÃO DO PONTO DE ORVALHO (°C)														
TEMPERATURA (°C)	UMIDADE RELATIVA DO AR (%)													
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	
-5	-19	-17	-16	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-8	-7	-6	
0	-14	-12	-11	-10	-8	-7	-6	-5	-5	-4	-3	-2	-1	
5	-10	-9	-7	-6	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	
10	-7	-5	-3	-2	0	1	2	3	5	6	7	7	8	
15	-3	-1	1	3	4	6	7	8	9	10	12	13	13	
16	-2	-1	1	4	5	7	8	10	11	11	13	14	14	
17	-2	0	2	4	6	8	9	11	12	12	13	15	15	
18	-1	1	3	5	7	8	10	12	13	13	15	16	16	
19	0	2	4	6	8	9	11	12	13	14	16	16	17	
20	1	3	5	7	9	10	12	13	14	15	17	17	18	
21	2	4	6	8	10	11	13	14	15	16	18	18	19	
22	2	5	7	9	11	12	13	15	16	17	18	19	20	
23	3	5	8	10	12	13	14	16	17	18	19	20	21	
24	4	6	9	11	12	14	16	17	18	19	21	21	22	
25	5	7	10	12	13	15	16	17	19	20	21	22	23	
26	6	8	11	13	14	16	17	18	19	21	22	23	24	
27	7	9	12	14	15	17	18	19	21	22	23	24	25	
28	8	10	12	14	16	18	19	20	22	23	24	25	26	
29	9	11	13	15	17	18	21	21	23	24	26	26	27	
30	9	12	14	16	18	19	21	22	22	25	26	27	28	
31	10	12	15	17	18	20	22	23	25	26	27	28	29	
32	11	13	16	18	19	21	23	24	26	27	28	29	30	
33	12	14	16	19	20	22	24	25	27	28	29	30	31	
34	13	15	17	20	21	23	26	26	28	29	29	31	32	
35	14	16	18	20	22	24	25	27	28	30	31	32	33	
36	15	16	19	21	23	25	27	28	30	31	32	33	34	
37	16	17	20	22	24	26	28	29	31	32	33	34	35	
38	17	18	21	23	25	27	29	30	32	33	34	35	36	
39	18	19	22	24	26	28	30	31	33	34	35	36	37	
40	18	20	23	25	27	29	31	32	34	35	36	37	38	

A Figura 3.4, mostra que nas áreas com maior humidade, cantos e juntas é onde ocorre a maior corrosão. Assim, a corrosão designada como seca não vai ser considerada neste trabalho, pois é insignificante.



Figura 3.4-Área corroída por corrosão uniforme - [5]

Ao longo do tempo a corrosão em juntas pode aparecer, prejudicando a boa conexão das ligações.



Figura 3.5-Corrosão em juntas - [9]

Normalmente o tipo de corrosão corrente em juntas é a galvânica, devido aos vários materiais metálicos diferentes em contato imersos no mesmo eletrólito; a transferência de eletrões de um material para o outro (Figura 3.6), ocorre com a diferença de potencial elétrico entre eles.

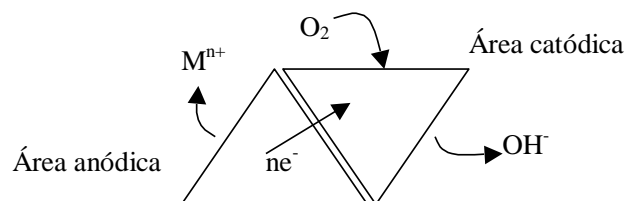


Figura 3.6-Reação de Corrosão galvânica - [9]

### 3.5.1.2. Efeito do vento

Embora todos os outros parâmetros que serão referidos sejam desfavoráveis, este efeito do vento pelo contrário pode ser favorável; é o caso da corrosão provocada apenas por humidade, em que o vento ajuda no processo de secagem da humidade, contribuindo para a diminuição do teor de humidade e em consequência o teor de corrosão.

Já no caso de a corrosão ser eletroquímica o vento é desfavorável, ajudando a acelerar esse processo.

No relatório [10], são descritas cinco categorias de topografia, que serão as utilizadas neste trabalho:

Categoria 1: zonas com terreno plano;

Categoria 2: zonas com terreno levemente inclinado;

Categoria 3: zona com terreno inclinado;

Categoria 4: colinas ou comes;

Categoria 5: zonas extremamente ventosas.

### 3.5.1.3. Corrosão atmosférica devido à presença de poluentes

A presença de pH maior que 6 e menor que 12 favorecem a corrosão como se pode comprovar, pelo gráfico da (Figura 3.7).

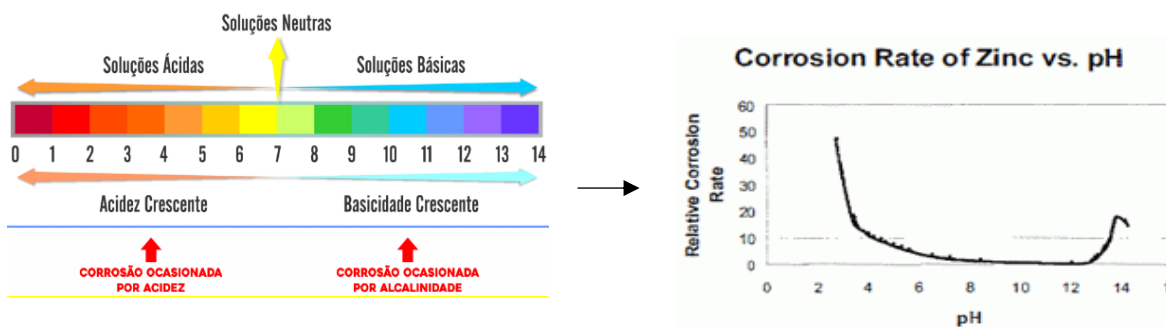


Figura 3.7-Rácio de corrosão em função de pH - [11]

De acordo com as Figura 3.8 e Quadro 3.2, podemos prever a classe de corrosão atmosférica, pelo tipo de zona onde estamos localizados, conseguindo à partida uma previsão inicial da classe de corrosão atmosférica.

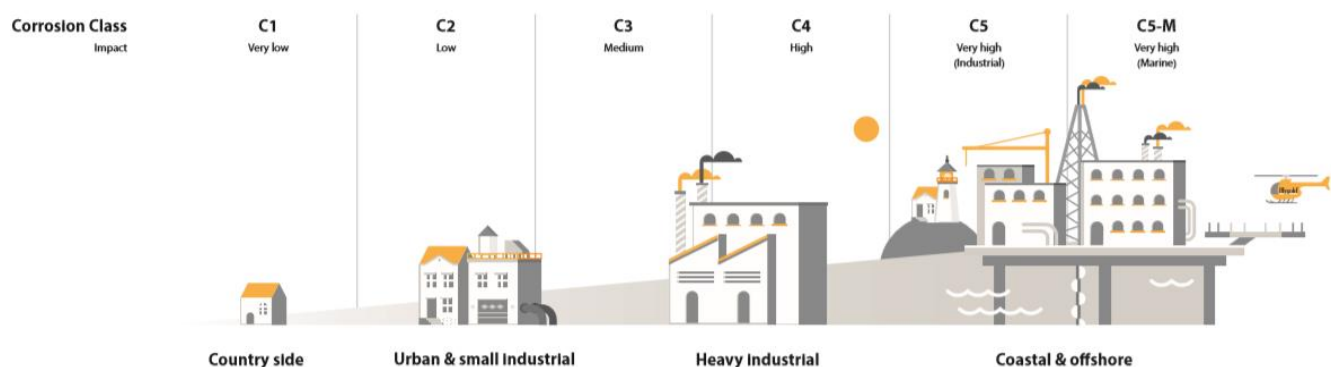


Figura 3.8-Classes de corrosão atmosférica - [12]

Quadro 3.2-Classes de corrosão atmosférica - [13]

Categoria de corrosividade	Tipos de ambientes exteriores
C1 (Muito Baixa)	Zonas secas ou frias; contaminação muito baixa de poluentes; tempo de humidade muito baixo, por exemplo: deserto, zona antártica.
C2 (Baixa)	Zona temperada; baixa poluição ( $\text{SO}_2$ [ $\mu\text{g} / \text{m}^3$ ] $<12$ ), por exemplo: áreas rurais e pequenas cidades. Zonas secas ou frias; períodos húmidos curtos, por exemplo: zonas desertas, zonas sub árticas.
C3 (Média)	Zonas temperadas; contaminação média de poluentes ( $12 < \text{SO}_2$ [ $\mu\text{g} / \text{m}^3$ ] $<40$ ); baixas influências de cloreto, por exemplo: áreas urbanas, áreas costeiras caracterizadas por baixa taxa de deposição de cloreto. Zonas tropicais com baixa poluição.
C4 (Alta)	Zonas temperadas; altos níveis de poluição ( $40 < \text{SO}_2$ [ $\mu\text{g} / \text{m}^3$ ] $<80$ ); influências de cloreto importantes, por exemplo: áreas urbanas poluídas, áreas industriais, áreas costeiras (sem zonas de salpicos), influência de sal de degelo. Zonas tropicais com nível médio de poluição.
C5 (Muito Alta)	Zonas temperadas; níveis muito altos de poluição ( $80 < \text{SO}_2$ [ $\mu\text{g} / \text{m}^3$ ] $<250$ ); concentração de cloreto fortes, por exemplo: zonas industriais, zonas costeiras e marinhas (sem zonas de salpicos). Zonas tropicais com altos níveis de poluição e / ou fortes influências de cloretos.



#### 3.5.1.4. Verificação Corrosividade atmosférica – ISO 9223

Se for pretendida uma precisão maior da classe de corrosão atmosférica, podemos confirmá-la medindo alguns indicadores.

- TOW – “*Time of wetness*” (tempo de humidade)

Para nos situarmos na categoria TOW, basta saber que tipo de espaço e controlo climático estamos inseridos (Quadro 3.3).

Quadro 3.3- Tempo de humidade pela ISO 9223 (ISO 2012b) - [14]

Categoria TOW	TOW [Hr/ano]	Tipo de ambiente
T1	$TOW \ll 10$	Interiores com controlo climático
T2	$10 < TOW \ll 250$	Interiores sem controlo climático
T3	$250 < TOW \ll 2500$	Exteriores com clima seco, ou climas frios
T4	$2500 < TOW \ll 5500$	Exteriores em outros climas
T5	$TOW > 5500$	Climas húmidos

- Categorias SD (concentração de  $SO_2$ ) e CD (concentração de cloretos)

Utilizando um kit para medição de pH e presença de cloretos, procedem-se às seguintes etapas no local:

1. Inicialmente limpa-se uma área de 100\*100 mm (Figura 3.9).



Figura 3.9-Processo para recolha de amostra de pH e cloretos - [14]

2. Regista-se o valor da concentração de cloretos e pH em (mg/L) dado pelo kit (Figura 3.10), multiplicando-os por 0.025 (volume de água destilada da amostra) converte-se o valor para ( $mg/m^2$ ). Se for pretendido um valor mais preciso, deve-se realizar o ensaio em espaços de tempo de 3 meses, calcular a média destes valores, convertendo o valor para ( $mg/m^2$ ) por dia.



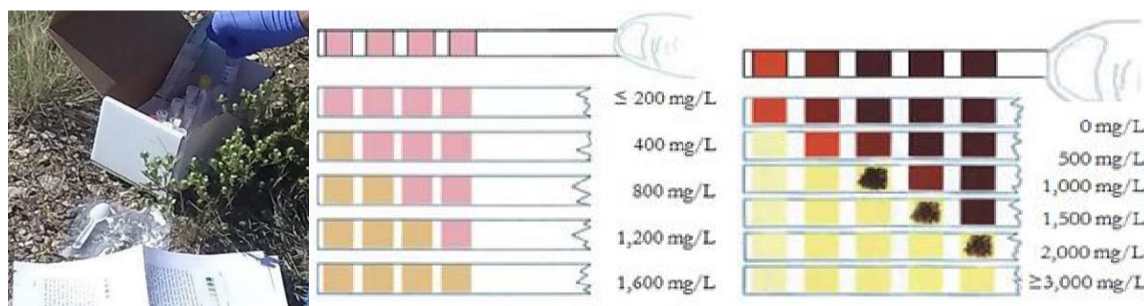


Figura 3.10-Kit usado para medição de cloretos e pH- [14]

Após isso consultam-se os Quadro 3.4 e Quadro 3.5 para atribuir as respectivas categorias.

Quadro 3.4- Categorias de sulfatos pela ISO 9223 (ISO 2012b) -[14]

Categoria SD	Rácio de deposição de SO <sub>2</sub> [mg/(m <sup>2</sup> d)]
P0	SD << 10
P1	11 << SD << 35
P2	36 << SD << 80
P3	81 << SD << 200

Quadro 3.5-Categoria de cloretos pela ISO 9223 (ISO 2012b) - [14]

Categoria CD	Rácio de deposição de Cloreto [mg/(m <sup>2</sup> d)]
SP0	CD << 3
S1	4 << CD << 60
S2	61 << CD << 300
S3	301 << CD << 1500

- Resultado ISO 9223

Combinando os fatores TOW, CD e SD obtidos, sabe-se a classe de corrosão atmosférica (Quadro 3.6).

Para ter uma a solução única da classe de corrosão, a classe de corrosão, irá ser a maior das classes referidas na ISO 9223, para cada combinação.

Quadro 3.6-Categorias de corrosão pela ISO 9223 (ISO 2012b) -[14]

Categoria de humidade	Categoria CD	Categoria SD	Categoria de corrosividade
T1	S0 ou S1	P1 ou P2	C1
		P3	C2
	S2	P1 ou P2	C1
		P3	C2
	S3	P1 ou P2	C2
		P3	C2
T2	S0 ou S1	P1	C1
		P2	C2
		P3	C2
	S2	P1	C2
		P2	C3
		P3	C3
	S3	P1 ou P2	C4
		P3	C4
T3	S0 ou S1	P1	C3
		P2	C4
		P3	C4
	S2	P1 ou P2	C4
		P3	C5
	S3	P1	C4
		P2	C5
		P3	C5
T4	S0 ou S1	P1	C3
		P2	C4
		P3	C5
	S2	P1 ou P2	C4
		P3	C5
	S3	P1, P2 ou P3	C5
T5	S0 ou S1	P1	C4
		P2	C5
		P3	C5
	S2	P1, P2 ou P3	C5
	S3	P1, P2 ou P3	C5

Apenas inserindo os dados extraídos do kit de pH e cloretos, o ficheiro do Anexo A foi programado para realizar todas as combinações dos vários parâmetros TOW, CD e SD automaticamente, informando a classe corrosão correspondente.

### 3.5.1.5. Classificação da corrosividade atmosférica pelo laboratório, norma IEC 60815

Na impossibilidade de acesso aos aparelhos adequados para medir o grau de corrosão atmosférico, pode-se enviar uma amostra local para laboratório. Os passos da Figura 3.11 são relativos aos procedimentos na recolha das amostras.



Figura 3.11-Processo de recolha de amostra para análise- norma IEC 60815 - [15]

No laboratório, procede-se à medição da densidade de depósito de sal equivalente ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ), designada por DDSE; para isso é necessário medir a condutividade à temperatura da solução  $C_\theta (\text{S}/\text{m})$ .

Com a condutividade  $C_\theta (\text{S}/\text{m})$  consegue-se obter a condutividade a  $20^\circ\text{C}$  pelo fator b do ábaco da Figura 3.12, juntamente com a fórmula  $C_{20} = C_\theta [1 - b (\theta - 20)]$ , sendo  $\theta$  a temperatura da solução.

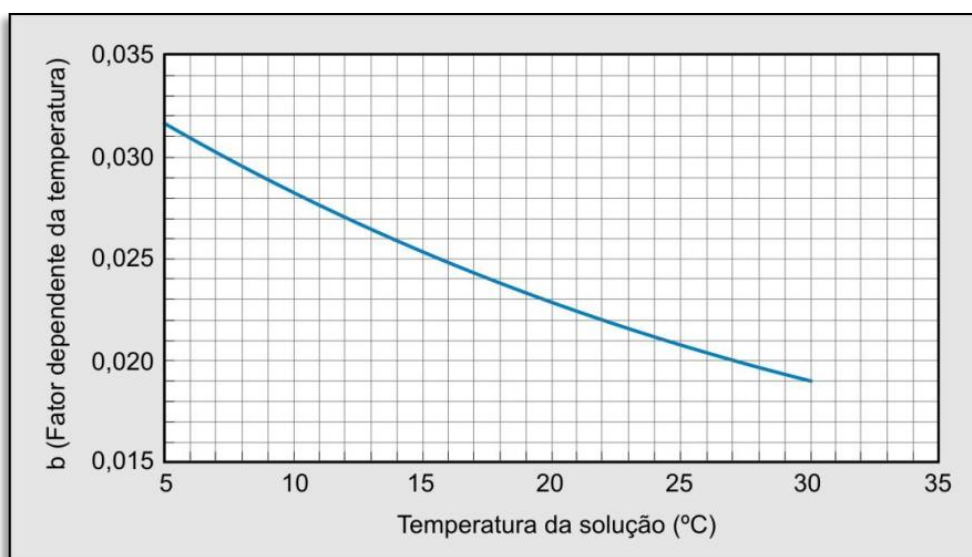


Figura 3.12-fator b em função da temperatura - [15]

A DDSE é dada pela equação (3.5)

$$S * V/A \quad (3.5)$$

em que:

S é a salinidade equivalente (g/L)

V é o volume de água (mL)

A é a área determinada para lavagem (cm<sup>2</sup>)

Precisa-se também da densidade de depósito de não-solúveis (mg/cm<sup>2</sup>) designada DDNS, para classificar a corrosão atmosférica; esta é calculada pela equação (3.6)

$$DDNS = 1.000 (W_f - W_i)/A \quad (3.6)$$

em que:

W<sub>f</sub> (g) é o peso do papel filtro contendo os poluentes sob condições secas (g), ver Figura 3.13 .

W<sub>i</sub> (g) é o peso inicial do papel filtro sob condições secas (g), ver Figura 3.13.

A (cm<sup>2</sup>) é a área determinada para lavagem (cm<sup>2</sup>) , ver Figura 3.13.

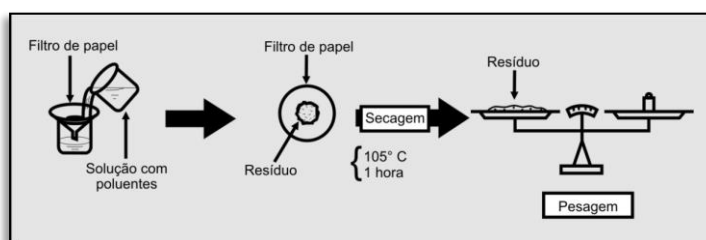


Figura 3.13-Pesagem dos poluentes

Com a combinação dos métodos DDNS e DDSE consegue-se saber a classe de corrosão atmosférica, pelo ábaco da Figura 3.14.

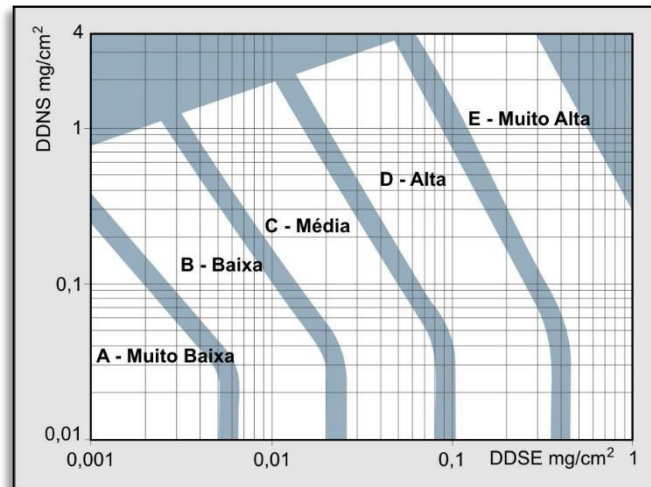


Figura 3.14 - Classe de poluição natural ou categoria de corrosividade atmosférica – norma IEC 60815

### 3.5.2. CORROSIVIDADE DO SOLO

A corrosividade do solo é importante para estruturas enterradas. Há estudos que provam que a cor do solo está relacionada com os minerais nele presentes, que por sua vez são indutivos de corrosão. Pelo relatório [10], sabe-se que solos com cor cinza ou verde são corrosivos, já solos acastanhados ou avermelhados não o são.

### 3.6.INSPEÇÃO DO REVESTIMENTO

Nesta fase de elaboração do relatório de inspeções, vamos tentar definir a classe de corrosão através da descrição visual da torre.

A condição do aço é avaliada de acordo com as fotografias padrão que mostram o aço em vários estádios da deterioração. Para isso cada parâmetro está dividido em 5 subescalas de pormenor (muita baixa , baixa, média, alta, muito alta) ou em alguns casos em 3 (baixa, média, alta).

A cada parâmetro é atribuído um peso de 0 a 5, o que permite realizar uma média ponderada da pontuação.

#### 3.6.1. RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE



Figura 3.15-a) Aspreza baixa b), Aspreza moderada, c), Aspreza alta, d) Aspreza muito elevada(Barragan, 2016) - [14]

Na base em imagens de inspeção do relatório [14], sugere-se que se risque a superfície com um giz para uma 1ª classificação da rugosidade. Através disto, consegue-se detetar pelo aspeto e sensibilidade, o tipo de aspereza, que como é logico também está ligado ao grau de corrosão. Com este teste também se pode avaliar a dureza da superfície em geral.

Com a utilização de um medidor de rugosidade, é possível saber um valor mais preciso da rugosidade do aço (em mm), e verificar se ela se encontra próxima de 0.15 mm que é o normal.

### 3.6.2. EMPOLAMENTO

Existem dois tipos de empolamento, o relacionado com a aplicação da pintura e o relacionado com a exposição ao ambiente.

O empolamento devido à aplicação do revestimento pode surgir devido a:

- Dissolventes na pintura que tendem a evaporar quando o grau de viscosidade permite a libertação;
- Ar entre a pintura e o aço, que se liberta em forma de empolamento (*efeito “popping”*);
- Na aplicação de pintura em superfícies húmidas, quando a humidade evapora forma-se o empolamento.

O problema de empolamento devido à exposição é o mais corrente: as “bolhas” com o tempo, têm tendência a se relacionarem com produtos corrosivos e gerar corrosão ativa. Quando ocorre drenagem, as “bolhas” secam e há uma tensão no recobrimento devido à perda de espessura.

Este problema pode ocorrer, devido a:

- Dissolução de sais pela humidade, o que faz aumentar a película de humidade;
- Sais solúveis no revestimento, que permitem uma permeabilização mais fácil;
- Atividade do ião hidrogénio. Neste caso, embora não aparente corrosão, há a presença de um líquido alcalino no interior das “bolhas”.

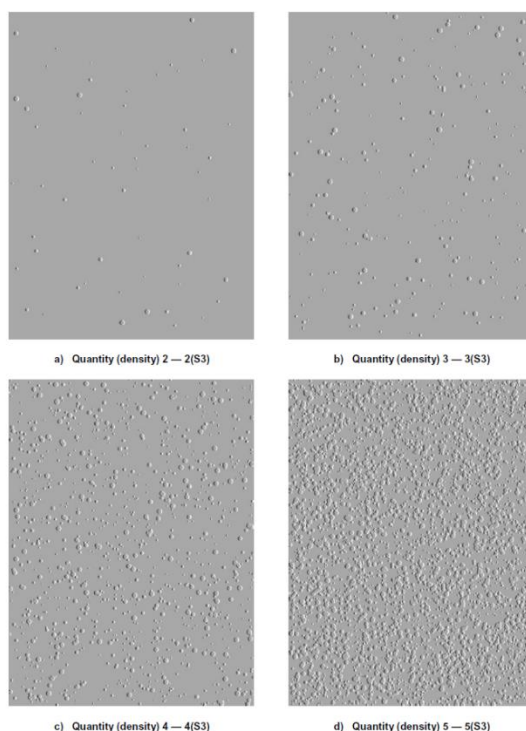


Figura 3.16-Densidade de empolamento - [16]

As normas ISO 4628/2e ASTM D 714 permitem uma classificação visual fácil deste parâmetro pelas Figura 3.16 e Quadro 3.7.



Quadro 3.7- Empolamento - ISO 4628/2 e ASTM D 714 - [8]

UNE – ISO	Densidade	Tamanho	
	ASTM	UNE-ISO	ASTM
0	Nenhuma	1*10 aumentos	< N ° 8
1	Muito pouca	2 visível N°8	
2	pouca	3 maior que 0.5 mm	N°6
3	Média	4 0.5-5 mm	N°4
4	Média - Alta	5 >5 mm	N°2
5	Alta		

### 3.6.3. GIZAMENTO -CLASSIFICAÇÃO, ISO 4628-6

Designa-se por gizamento a degradação natural da película de tinta causada pela exposição aos raios ultravioleta, caracterizada pela perda de brilho, cor e formação de pó na superfície da película.



Figura 3.17-Efeito de gizamento - [8]

Para procedermos à sua medição, coloca-se uma fita adesiva transparente por cima da superfície de modo que o gizamento fique marcado na fita. Após isso coloca-se uma fita que contraste a transparente (branca ou negra dependendo do caso) e identifica-se o caso em questão perante a Figura 3.18 .



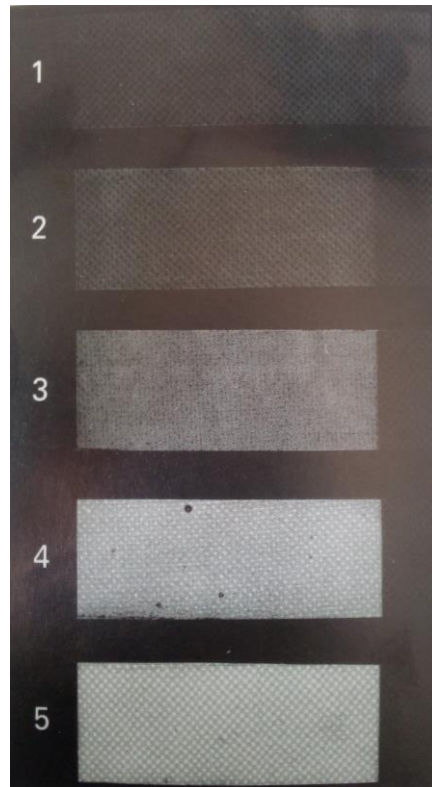


Figura 3.18- Classificação, ISO 4628-6 - [8]

### 3.6.4. DESCAMAÇÃO

As causas da falta de aderência são diversas [8]:

- Deficiente preparação da superfície;
- Contaminação da superfície entre o revestimento e o aço;
- Camadas a mais de retoques de pintura;
- Incompatibilidade do tipo de material usado para revestimento e o aço;
- Ataque de dissolventes;
- Revestimento demasiado fino;
- Revestimento mal seco.

Com as variações de temperatura ao longo do dia, o aço sofre dilatações e contrações, que provocam fissuração e descamação posteriormente (Figura 3.19).

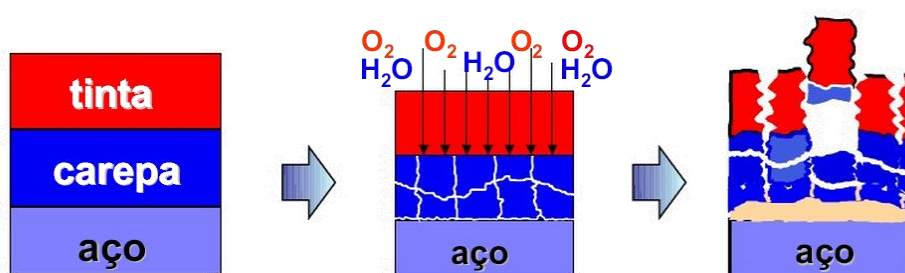


Figura 3.19-Processo que origina a descamação-[15]

Na classificação da intensidade de descamação conta-se com a ajuda da norma ISO 4628/2 e ASTM D 661 (Quadro 3.8).

Quadro 3.8- Grau de descamação – “Flaking” ISO 4628/2 e ASTM D 661 - [8]

	Densidade	Tamanho	
UNE – ISO	ASTM	UNE-ISO	ASTM
0(0 %)	Nenhuma	0	< N ° 8
1(0.1 %)	Muito pouca	1(1mm)	Nº8
2(0.3 %)	pouca	2(3mm )	Nº6
3(1 %)	Média	3(10 mm)	Nº4
4(3 %)	Média - Alta	4(30 mm)	Nº2
5(15 %)	Alta	5(>30 mm)	

Caso a densidade seja inferior a 4, é possível reparar localmente a área; caso contrário será necessário reparar toda a área.

#### 3.6.4.1. Ensaio de corte em X – teste de aderência destrutivo ASTM D 3359 Método A



Figura 3.20-Caso de perda de aderência - [16]

Através de um corte executado em X (Figura 3.21) realizado na superfície, pode-se saber o nível de aderência da película através da Figura 3.22.



Figura 3.21-Realização de um corte em X - [8]

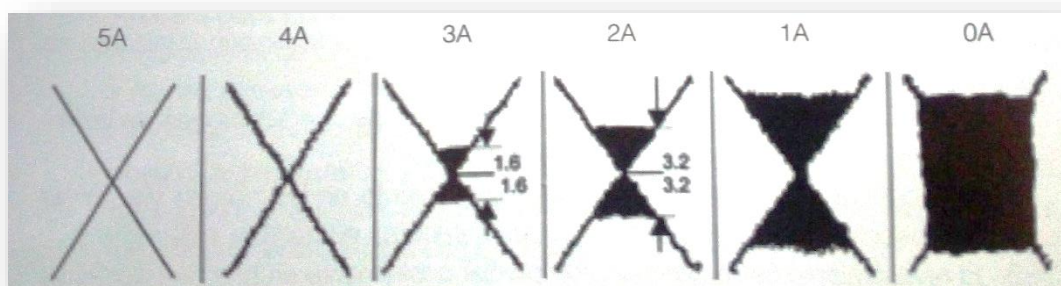


Figura 3.22-Classificação ASTM D 3359 Método A- [8]

### 3.6.5. POROSIDADE

Os fatores ambientais podem provocar porosidade, com o passar do tempo (Figura 3.23).



Figura 3.23-Exemplo de porosidade - [8]

### 3.6.6. TIPOS DE CORROSÃO

Existem três tipos de corrosão, a localizada (“*spot rusting*”), a generalizada (“*general rusting*”) e por pontos (“*pitting rusting*”). A corrosão mais comum é a generalizada, como será comprovado no trabalho de campo posterior. A corrosão por pontos ocorre principalmente devido à presença de cloretos.

As estruturas metálicas todos os dias estão sujeitas a várias ações ambientais. A norma ISO 8501-1 ajuda-nos a descrever os estados de intempérie que as estruturas estão sujeitas.

Através da Figura 3.24, podemos observar que o sol e a chuva provocam vários estádios de degradação da superfície ao longo do tempo.

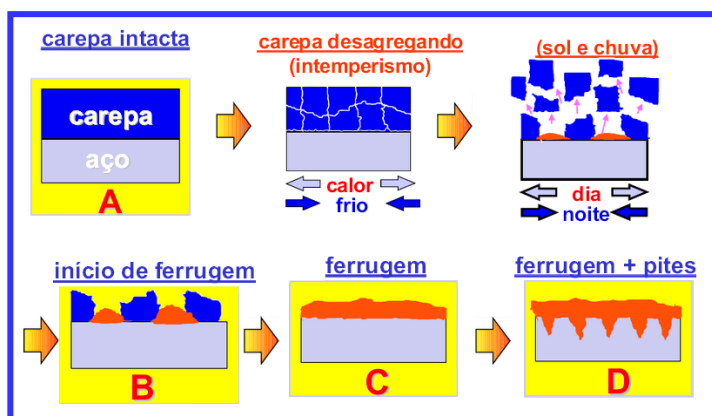


Figura 3.24-Causas dos graus de corrosão por intempéries - [17]

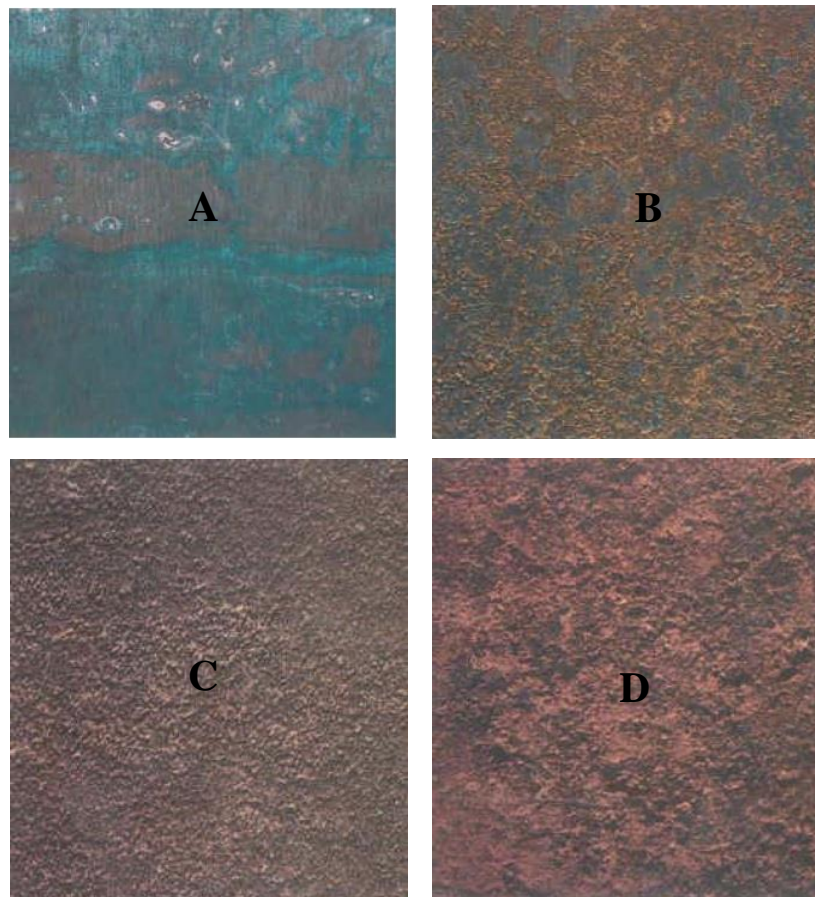


Figura 3.25-Graus de intempérie A,B,C,D - [17]

O revestimento da estrutura com o calor dilata e com o frio encolhe; esta combinação de fenómenos ao longo do dia provoca fissuração e com o passar do tempo desagregação. Após acontecer isso, torna-se mais fácil a corrosão penetrar no aço pontualmente (*“Pitting corrosion”*), de acordo com a Figura 3.24.

### 3.6.6.1. Corrosão tipo “*Rusting*”

Nomeada por uma corrosão generalizada, e confundida habitualmente com “descamação da superfície”. Caso a superfície aparente o estado *Ri4* ou *Ri5* (Figura 3.26), as torres devem sofrer uma intervenção imediata.

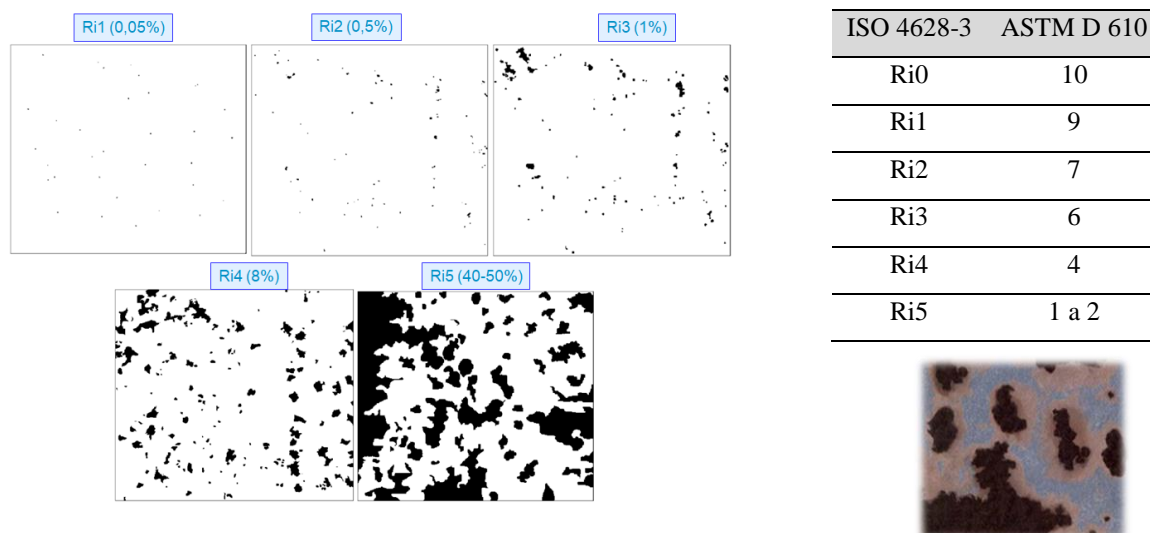


Figura 3.26-Nível de “*Rusting*”-, Classificação, ISO 4628-3 [16] e ASTM D 610 [8]

### 3.6.6.2 Corrosão “*Pitting*”

A corrosão por pontos ocorre devido à presença de  $\text{Cl}^-$ . O ião  $\text{Cl}^-$  ataca a camada protetora de alguns materiais como aços inoxidáveis e ligas de Al (destrói as camadas de óxido de Cr e de óxido de Al, ambas protetoras) e gera corrosão localizada.

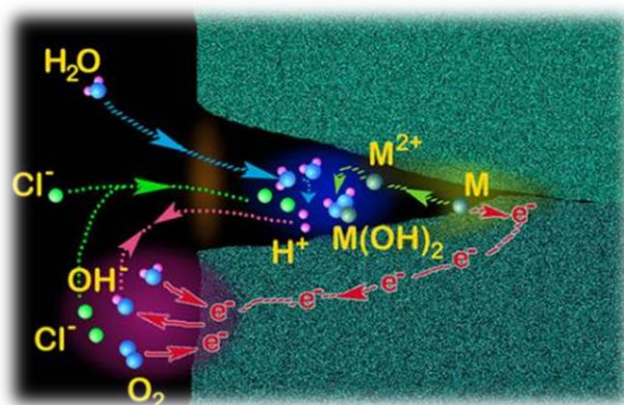


Figura 3.27-Interpretação iónica da corrosão por pontos - [9]

A classificação de ASTM G46 classifica cinco níveis de “*pitting*”; no relatório de inspeções que será desenvolvido, usam-se estes 5 níveis para escalar a pontuação neste tópico.



Conforme já referido, este tipo de oxidação é o tipo mais gravoso pois provoca a formação de um concavidade (Figura 3.28).

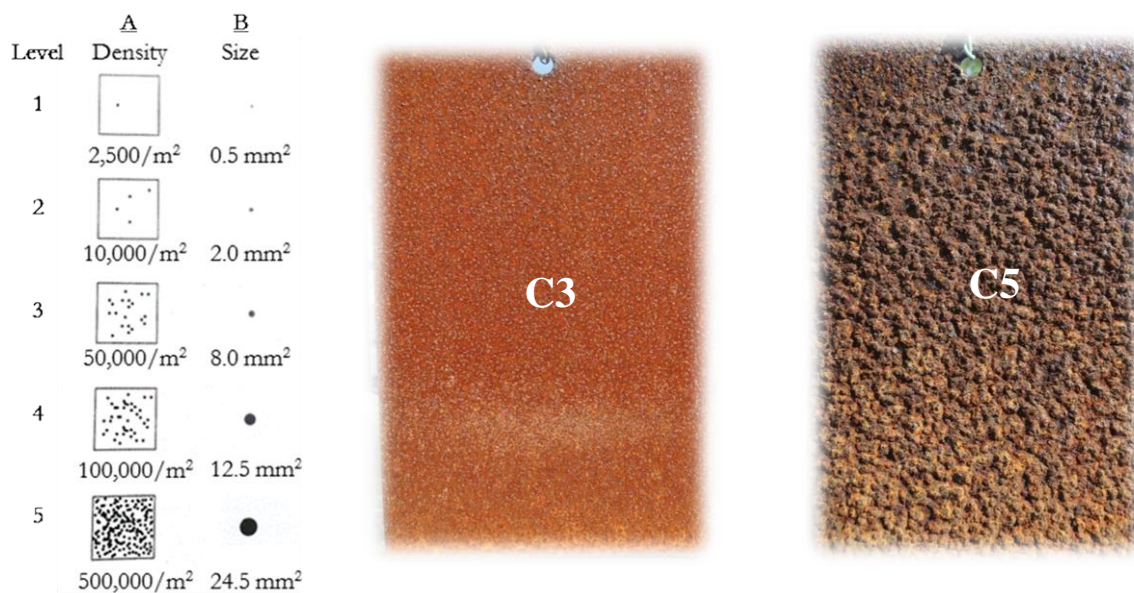


Figura 3.28-classificação de ASTM G46 (ASTM 2013c) - [14] e [9]

### 3.6.7. FISSURAÇÃO

A fissuração acelera a invasão da corrosão, pois o revestimento fica menos desprotegido.

Novamente as normas UNE ISO 4268/4 e ASTM D 660, classificam 5 graus de fissuração visuais indicados no Quadro 3.9 e Figura 3.29.

Quadro 3.9- Graus de fissuração ("Cracking") - ISO 4268/4 <> ASTM D660- [8]

UNE – ISO	Densidade		Tamanho	
	ASTM	UNE-ISO	ASTM	
0	Nenhuma	0(não visível *10)	< N ° 8	
1	Muito pouca	1(*10 aumentos)	Nº8	
2	Pouca	2 (visível)	Nº6	
3	Média	3(visível claramente)	Nº4	
4	Média - Alta	4(1mm)	Nº2	
5	Alta	5(> 1mm)		

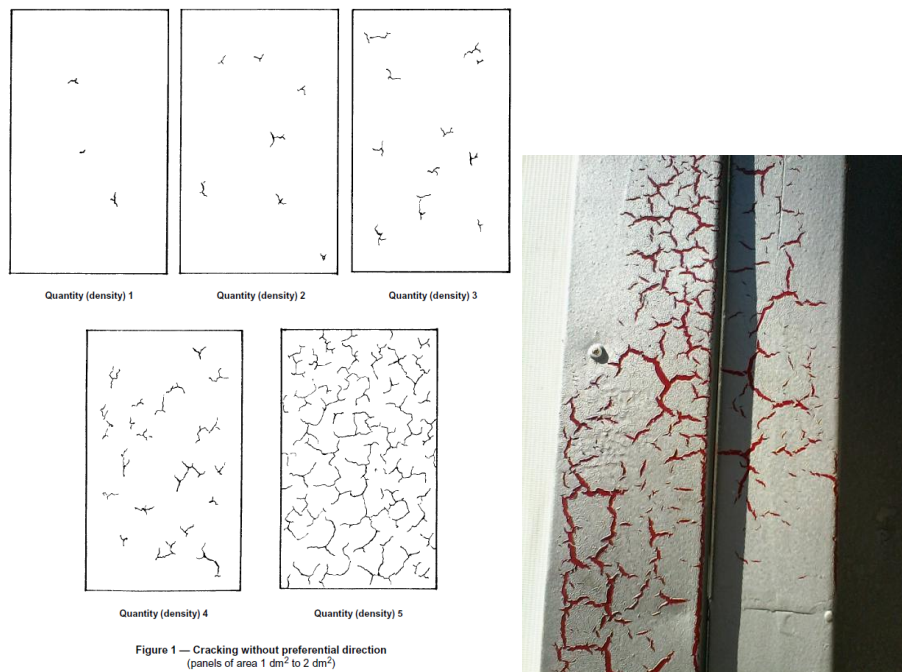


Figura 3.29- Fissuração descontrolada [16]

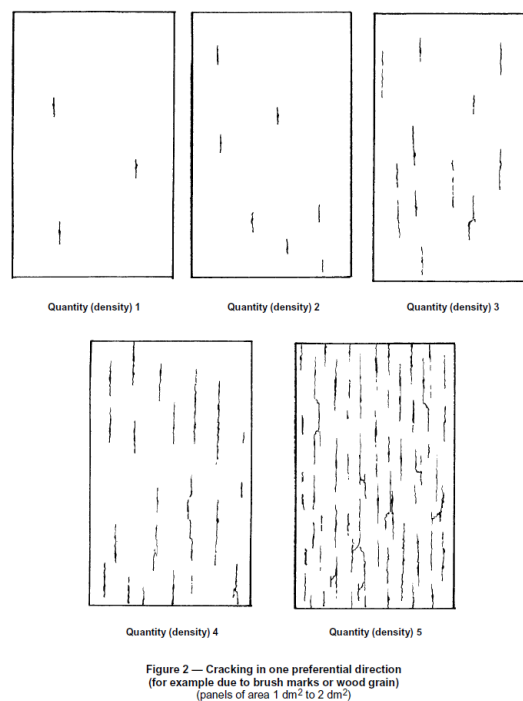


Figura 3.30-Fissuração ortogonal-[16]



### 3.6.7.1. Detecção de falhas e descontinuidades com o teste ultra-som

A partir do teste ultra-som, consegue-se detetar as descontinuidades das superfícies e respetivas fissuras e porosidades. Caso o resultado apresente um pico no gráfico (Figura 3.31), isso quer dizer que a superfície tem descontinuidades pronunciadas.

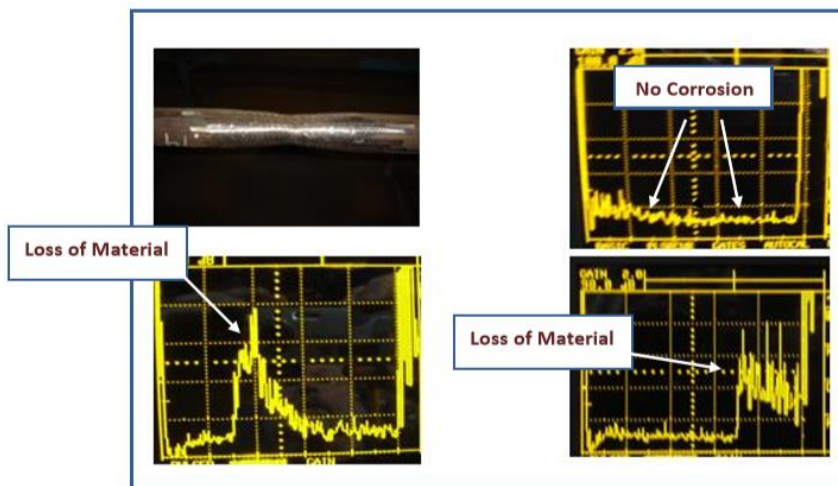


Figura 3.31-Tipos de resultados teste ultra som - [10]

## 3.7.INSPEÇÃO ESTRUTURAL

### 3.7.1. GRAU DE CORROSÃO PELA ESPESSURA PERDIDA

Através da utilização de um medidor de Espessura de Película Seca (Figura 3.32), sabe-se a espessura do aço galvanizado; comparando com a espessura da chapa normalizada inicial, sabe-se o rácio de espessura perdida ao longo do tempo. Se este ultrapassar os 20% a corrosão é considerada severa [8].



Figura 3.32- medidor de Espessura de Película Seca

Barras fendilhadas e partidas poderão ser um problema dependendo do local ou zona estrutural onde ocorram (como será exposto no capítulo 5).



Figura 3.33-barras partidas - [9]

### 3.8.PONDERAÇÃO DOS VÁRIOS PARÂMETROS NA INSPEÇÃO DO REVESTIMENTO

Quadro 3.10-Pesos (ponderações) dos parâmetros de inspeção

Parâmetros	Peso (0-5)
Rugosidade	3
Descamação do revestimento	4
Porosidade	1
Gizamento	3
Empolamento	3
Tipo de corrosão	4
Fissuração	4

Parâmetros com um peso de 5, são parâmetros completamente decisivos.

A fissuração e a descamação da superfície são parâmetros que demonstram a degradação forte da superfície, ficando então com uma pontuação de 4 pontos, pois têm grande poder de decisão.

Parâmetros que têm alguma importância, mas não são catastróficos têm um peso de 3 pontos; como é o caso do gizamento, empolamento e rugosidade.

Crítérios que não são muito frequentes, têm o peso de 1.

### 3.9. TRABALHO DE CAMPO

O trabalho de campo realizado no âmbito desta tese sobre a corrosão de torres metálicas, para exemplificar os critérios de classificação anteriormente enunciados, incidiu sobre a observação de uma torre na Rua do Vertido, freguesia de Campo, concelho de Valongo, distrito do Porto.

#### 3.9.1. FOTOGRAFIAS GERAIS

Numa primeira observação, nota-se logo que a torre no geral está corroída, parecendo existir há bastantes anos.

Esta torre encontra-se localizada numa zona urbana. É importante salientar, que esta zona fica praticamente em cima de uma entrada para a auto-estrada A4, ou seja um local onde se gera bastante poluição atmosférica derivada da circulação de veículos automóveis, consumindo hidrocarbonetos e libertando para a atmosfera os gases agressivos dessa combustão. Este último aspeto é fortemente evidenciado pela oxidação do aço presente ao longo da altura da torre, mais concretamente a meio da altura.

O terreno apresenta alguma inclinação, a zona é bastante ventosa devido à sua altitude, e só tem algumas árvores. Este parâmetro irá agravar a corrosão provocada por poluentes, mas também irá diminuir a corrosão provocada pela humidade.



Figura 3.34-Vista geral da secção corroída

As secções desta torre são em forma de cantoneiras. Devido a esse facto, os parafusos interiores ficam de certa forma protegidos, razão pela qual ainda demonstram estarem num bom estado (Figura 3.34).

De resto a torre não apresenta barras partidas, nem perfurações derivadas por elevada corrosão por pontos.



Figura 3.35-Estados dos elementos da torre

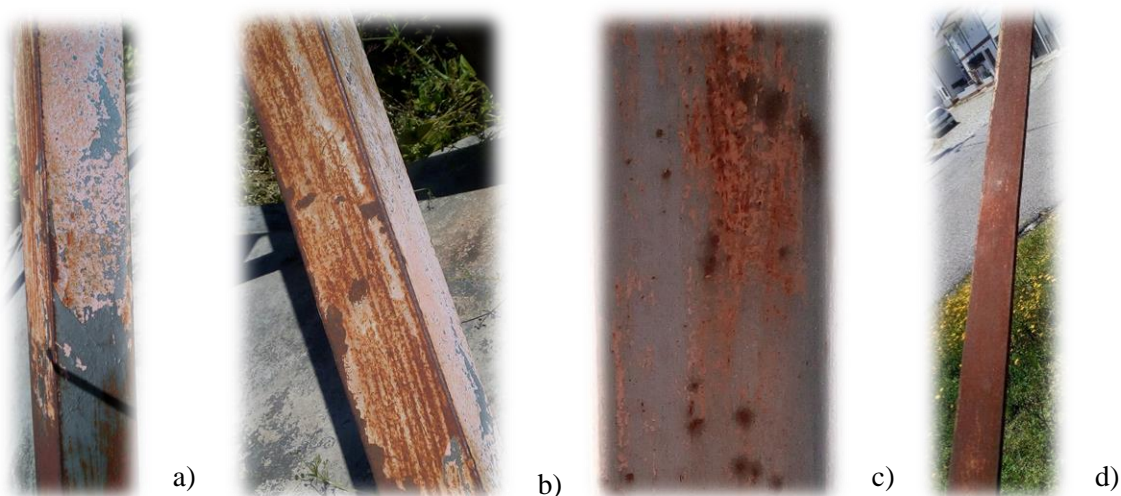


Figura 3.36-Exemplos de corrosão

Pela Figura 3.36, conseguimos observar como se processa a propagação da corrosão. Primeiro a tinta começa a descamar: a), depois a corrosão começa a infiltrar-se na superfície desprotegida, até que a superfície fica toda corroída d). As diagonais nesta torre ( Figura 3.36 d)) são as barras que apresentaram a superfície completamente corroída e em pior estado. As partes exteriores das cantoneiras, também apresentaram um estado degradante.



### 3.9.1.1. Relatório de inspeções do revestimento

Quadro 3.11 - Resultados de campo

Parâmetros	Observação	Peso (0-5)
Rugosidade	Muito Alta	3
Descamação do revestimento	Muito Alta	4
Porosidade	Baixa	1
Gizamento	Alto	3
Empolamento	Baixo	3
Corrosão "Pitting"	Baixa	4
Corrosão generalizada	Muito Alta	
Corrosão localizada	Muito Alta	
Fissuração	Muito Alta	4

Com estas observações, obteve-se uma pontuação ponderada de 73 pontos numa escala de 0 a 100, ou seja uma superfície que apresenta alta corrosão. Esta pontuação foi obtida realizando uma média ponderada, considerando os pesos dos parâmetros referidos no capítulo 3.8

### 3.9.1.2. Determinação da classe de corrosão atmosférica

O procedimento para a medição da classe atmosférica foi o descrito no subcapítulo 3.5.1.4.



Parâmetro	Categoria
TOW	T3 (Ar livre em climas secos ou frios)
CD	S1(300 mg/L=7.5 mg/m <sup>2</sup> )
SD	P3(7800 mg/L=195 mg/m <sup>2</sup> )

Figura 3.37-Resultados da análise de cloretos e pH

O resultado da classe de corrosão atmosférica foi C4, de acordo com as combinações dos parâmetros do Quadro 3.6.

### 3.10. SIMULAÇÃO NÚMERICA DA PERDA DE ESPESSURA

Cada ambiente tem uma taxa de corrosividade diferente, isto porque as concentrações de carbono e cloreto nos ambientes rural, urbano, industrial e marino diferenciam (Quadro 3.12 e Quadro 3.13).

Quadro 3.12-Concentração de cloreto de acordo com Liesegan, para diferentes tipos de ambientes - [18]

Tipo de ambiente	Cl (mg/m <sup>2</sup> por dia)
1.Rural	<30
2.Urbano	<30
3.Indústrial	<30
4. Marino	30-3000
5.Industrial marino	30-3000

Quadro 3.13-Concentração de SO<sub>2</sub> em (µg/m<sup>3</sup>) em diferentes tipos de ambientes- [19]

Média	Áreas industriais	Áreas Residências, rurais e outras	Áreas sensíveis
Anual	80	60	15
24 horas	120	80	30

A equação (3.7), consegue simular a perda de espessura ao longo do tempo, conforme o tipo de zona que se está inserido [20].

$$y = At^B \left( \frac{TOW}{C} \right)^D \left( 1 + \frac{SO_2}{E} \right)^F \left( 1 + \frac{Cl}{G} \right)^H e^{J(T+T_0)} \quad (3.7)$$

em que:

y é a espessura perdida em µm;

t é o tempo de exposição em anos;

SO<sub>2</sub> é a concentração de dióxido de enxofre em µm/m<sup>3</sup>, retirada do Quadro 3.13;

Cl é a taxa de deposição de cloreto em mg/m<sup>2</sup>/dia retirada do Quadro 3.12;

A=0.16,B=0.36,C=3.8,D=0.24,E=25,F=0.82,G=50,H=0.44,J=0.05,T<sub>0</sub>=20°C, todos os valores pela ISO CORRAG data - [20];

T é a temperatura do ar em °C, de valor por exemplo 20°C;

T<sub>0</sub> é a temperatura empírica, de valor 20°C;

TOW tempo de humidade Hr/ano, sendo igual a 2500 pelo Quadro 3.3.

Nota: Os índices A,B,D,F,H,J, são relativos ao material zinco, pois maior parte das torre são feitas de aço galvanizado, o que quer dizer possuem uma camada protetora de zinco. No início da tese o estudo não era para ser apenas direcionado para torres antigas, por isso os parâmetros de zinco adotados (composto de aço galvanizado). Se fosse apenas direcionado para torres centenárias, por exemplo, adotar-se-ia os parâmetros do aço de carbono, e a espessura perdida dobraria praticamente, como esta consequência é demasiado grave, foram utilizados os parâmetros do zinco que dão valores mais próximos dos valores padrão.

### 3.10.1. RESULTADO DA PERDA DE ESPESSURA EM FUNÇÃO DO TEMPO (EM ANOS)

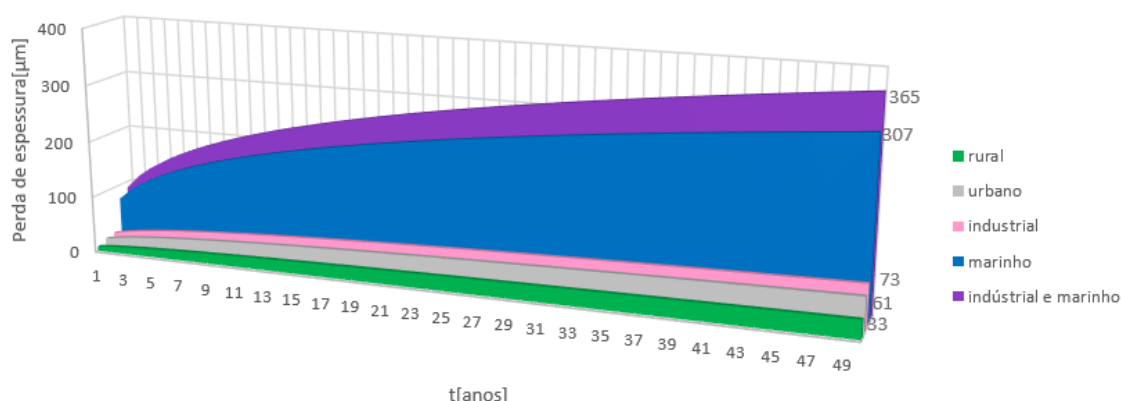


Figura 3.38-Perda de espessura em função do tempo da estrutura em anos

Na construção do gráfico anterior foram considerados os piores cenários de corrosão (para os piores cenários de índices de cloro) dentro de cada categoria de ambiente (rural, urbano, industrial, marinho, industrial e marinho).

Claro que os valores do gráfico da Figura 3.38, estão de acordo com os fatores anteriormente nomeados e da temperatura escolhida, ou seja não são valores padrão. Apesar disso as variações entre vários ambientes são as corretas e os resultados enquadram-se dentro dos valores padrão encontrados na referência [8].

Na referência [8], é apresentada a velocidade de corrosão em  $[\mu/\text{ano}]$  das várias categorias de corrosividade. Para a última categoria (C5) a velocidade de corrosão padrão é entre 4 a 8  $\mu/\text{ano}$ , ou seja multiplicando estes valores por 50 anos, resulta um intervalo de espessura perdida entre [0.1 a 0.4 mm], concluindo que 0.365 mm é um valor aceitável.

O facto de todas as curvas crescerem gradualmente, mostra que a corrosão atmosférica é uma fenomenologia monotónica crescente.

A corrosão que cresce mais rapidamente é sem dúvida a corrosão devido á presença de cloretos.

No Quadro 3.2, identificamos que as classes de corrosão C1(rural), C2(urbana), C3(industrial), C4(marinha) e C5(marinha e industrial) são respetivamente denominadas por corrosão Muito Baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta.

Este gráfico é muito importante para o último capítulo onde é simulada a perda de espessura no software “*Robot Structural Analysis Professional 2018*”. A variável espessura perdida representada graficamente, estará em intervalos de (0-0.07 mm) corrosão baixa, (0.07-0.3 mm) corrosão média e (0.3-0.365mm) corrosão alta.





# 4

## REVISÃO DOS EC1-1-4 E EC3 3-1 E DO MÉTODO SHINOZUKA NO CONTEXTO DE TORRES METÁLICAS

Normalmente a ação do vento em torres metálicas e postes de alta tensão é a ação condicionante, comparativamente à ação sísmica, ação do gelo, etc...

O Eurocódigo 3 parte 3-1 é a norma específica para torres e mastros. Essa norma redireciona-nos para o cálculo da força do vento pelo Eurocódigo 1 parte 1-4.

O Eurocódigo 1 parte 1-4, permite o cálculo do vento por duas abordagens, uma simplificada e outra mais complexa, que envolve mais fatores como o coeficiente estrutural e o coeficiente dinâmico de pico. Ambos os métodos irão ser abordados neste trabalho.

O cálculo do vento consiste na determinação de fatores, que têm em conta as propriedades físicas e aerodinâmicas destas estruturas, e que por sua vez permitem o cálculo das ações dinâmicas e quase estáticas sobre os elementos estruturais sujeitos ao vento.

As ações do vento em torres metálicas, qualificáveis de acordo com o EC1 e EC3, têm sido sistematicamente abordadas em teses de mestrado supervisionadas pelo orientador e foram consultadas para a realização deste capítulo [21], [22].

### 4.1.CASOS DE CARGA

A norma EN1993-3-1 faz referência a 3 classes de fiabilidade, que estão relacionadas a diferentes coeficientes de segurança (Quadro 4.1) atribuídos às forças.

Quadro 4.1- Classes de fiabilidade EN1993-3-1

Classe de fiabilidade	Descrição
1	Estrutura que devido à altura/localização representam um baixo risco para a vida humana, onde o atraso na devolução do serviço é aceitável
2	Estrutura que devido à altura/localização representam um risco substancial para a vida humana, provocando danos materiais em caso de falha
3	Estrutura que devido à altura/localização representam um risco elevado para a vida humana, provocando danos materiais em caso de falha e essencial para a garantia de serviço

Não sabendo a classe de fiabilidade desta torre, pois apenas foram facultados os dados da modelação, considerar-se-á a classe mais grave (Classe 3). Nessa lógica, o coeficiente de segurança de valor 1.2 é utilizado para cargas permanentes e 1.6 para cargas variáveis (Quadro 4.2).

Quadro 4.2- Fatores de segurança parcial EN 1993-3-1

Efeito	Classe de fiabilidade	Ações permanentes (GK)	Ações variáveis (Qk)
desfavorável	3	1.2	1.6
	2	1.1	1.4
	1	1	1.2
favorável	1	1	0
Acidentais	qualquer	1	1

A combinação de ações em estado limite último utilizada para fim dos resultados do capítulo 5 é caracterizada pela equação (4.1).

$$1.2*G_k + 1.6*Q_k \quad (4.1)$$

em que:

$G_k$  são as cargas permanentes (peso próprio dos vários elementos da torre e peso próprio dos equipamentos adicionais);

$Q_k$  são as ações variáveis (sobrecargas e vento).

## 4.2. HIPERESTATICIDADE

Quando uma estrutura deixa de ser isostática e passa a ser hipostática, deixa de ter as barras ou apoios necessários para a sua estabilidade.

A maior parte das estruturas são hiperestáticas, para que caso algum apoio/ barra falhe, a estrutura continue estável.

Quando acrescentamos um nó à estrutura, precisamos de mais 3 barras para a construção da estrutura (Figura 4.1).

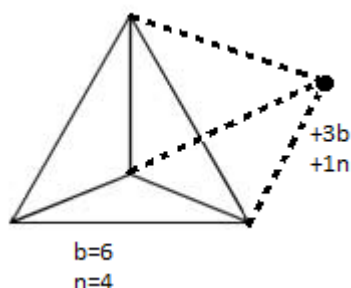


Figura 4.1-Construção do “esqueleto” de uma estrutura

Daí surge a equação de estabilidade geométrica da estrutura (4.2).

$$b-6=3*(n-4) \quad (=) \quad b=3n-6 \quad (4.2)$$

em que:

n      é o número de nós

b      é o número de barras

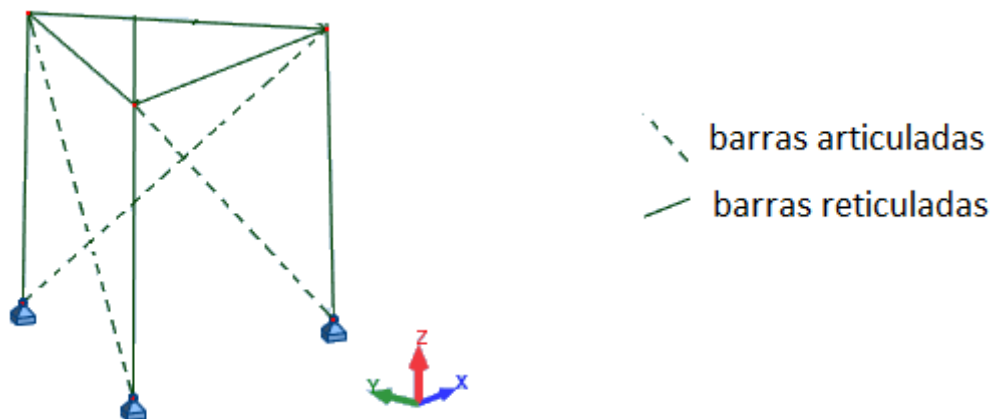


Figura 4.2-Troço de 6 graus de liberdade

Para uma estrutura 3D, sabe-se que cada nó tem 6 equações de equilíbrio. Nomeadamente, equilíbrio de esforço axial, de tensão tangencial em x, de tensão tangencial em y, de momento em x, de momento em y e de momento torsor.

Quando introduzida uma barra articulada entra apenas mais uma incógnita, pois só há esforço axial. No caso de ser reticulada entram as 6 incógnitas anteriores.

Os apoios possuem 3 incógnitas (reação em x, reação em y e reação em z).

Resolvendo a equação ( $n^{\circ}$  incógnitas =  $n^{\circ}$  equações de equilíbrio), para o exemplo da Figura 4.2 em 3 dimensões, resulta:

$$3*3\text{apoios}+6*6\text{ barras reticulas}+ 3\text{bielas}= 6*6\text{ nós} \quad (=) \quad 48>36 \quad (4.3)$$

,logo a estrutura da Figura 4.2 é 12\* hiperestática.

A estrutura da Figura 4.2 é apenas um mero exemplo, semelhante ao caso de estudo do capítulo 5.

#### 4.3. CÁLCULO DO VENTO PELO EC 1-1-4

Ao longo deste subcapítulo serão citadas secções do EC1-1-4, em que as fórmulas para o cálculo do vento se situam.

- Fórmula geral [Secção 5.3(2)]:

$$F_w = c_s c_d * c_f * q_p(z_e) * A_{ref} \quad (4.4)$$

##### 4.3.1. CÁLCULO $c_s c_d$ (COEFICIENTE ESTRUTURAL) [SECÇÃO 6.3(1)]:

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 * k_p * I_v(z_s) * \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 * I_v(z_s)} \quad (4.5)$$

em que:

- $z_s$  é altura de referência para a determinação do coeficiente estrutural (0.6H);
- $k_p$  é o fator de pico (equação (4.5.7));
- $I_v$  é a intensidade de turbulência (equação (4.5.1));
- $B^2$  é o coeficiente de resposta quase-estática, que tem em conta a falta de total correlação das pressões sobre a superfície da estrutura (equação (4.5.9));
- $R^2$  é o coeficiente de resposta em ressonância, que tem em conta o efeito da turbulência em ressonância com o modo de vibração (equação (4.5.11)).

A intensidade de turbulência ( $I_v$ ) [Secção 4.4(1)], é definida como o quociente entre o desvio padrão da turbulência e a velocidade média do vento, sendo esta obtida pela expressão (4.5.1).

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_r * k_l * v_b}{v_m(z)}, \text{ se } z_{min} \leq z \leq z_{m\acute{a}x}$$
$$I_{v(z)} = I_v(z_{min}), \text{ se } z < z_{min} \quad (4.5.1)$$

O valor recomendado para o coeficiente de turbulência ( $k_l$ ) é à unidade.

O comprimento de rugosidade ( $z_0$ ) e a altura mínima ( $z_{min}$ ) são obtidos pelo Quadro 4.3.

Quadro 4.3- Categoria de terreno Secção 4.3.2

Categoria de terreno	$Z_0$ [m]	$z_{min}$ [m]
0 Mar ou zona costeira exposta aos ventos de mar	0.03	1
I Lagos ou zona plana e horizontal com vegetação negligenciável e livre de obstáculos	0.01	1
II Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura	0.05	2
III Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: aldeias, zonas subterrâneas, florestas permanentes)	0.3	5
IV Zona na qual pelo menos 15 % da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 cm	1	10

- Cálculo da velocidade média  $v_m(z)=U(z)$

A velocidade média do vento a uma altura  $z$  acima do solo, ( $v_m(z)$ ), depende da rugosidade do terreno ( $c_r$ ), da orografia ( $c_0$ ) e do valor de referência da velocidade do vento ( $v_b$ ), e deverá ser determinado através da expressão (4.5.2).

$$\ddot{U}(z) = v_m(z) = c_r(z) * c_0(z) * v_b \quad (4.5.2)$$

- Velocidade de referência do vento [Secção 4.2(2)]:

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0} ; c_{dir} \text{ e } c_{season} = 1 \quad (4.5.3)$$

A velocidade de referência  $v_{b,0}$ , visto que nos situamos em Portugal continental é igual a 27 m/s.

A velocidade de base do vento é multiplicada por um coeficiente de probabilidade ( $c_{prob}$ ) (4.5.4).

$$c_{prob} = \left( \frac{1 - k * \ln(-\ln(1 - p))}{1 - k * \ln(-\ln(1 - 0.98))} \right)^n \quad (4.5.4)$$

em que:

$k$  é o parâmetro de forma, função do coeficiente de variação da distribuição de valores extremos, de valor igual a 0.2;

$n$  é o expoente, de valor igual a 0.5.

Na fórmula (4.5.4), caso se considere uma probabilidade igual a 55 %, o resultado do coeficiente  $c_{prob}$  é 1.03, aumentando a velocidade base para 27.82 m/s.

O coeficiente de rugosidade ( $c_r$ ), tem em conta a variabilidade da velocidade média do vento no local da construção, em resultado da altura acima do nível do solo, e da rugosidade do terreno a barlavento da construção na direção do vento considerada. Sendo determinado pela expressão (4.5.5) [Secção 4.3.1(1)], que se baseia num perfil de velocidades logarítmico.

$$c_r = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \text{ se } z_{min} \leq z \leq z_{m\acute{a}x}$$

$$c_r = c_r(z_{min}), \text{ se } z < z_{min}$$
(4.5.5)

O coeficiente de terreno ( $k_r$ ), depende do comprimento de rugosidade ( $z_0$ ) (Quadro 4.3) e é obtido através da expressão (4.5.6) [Secção 4.3.2(1)]:

$$k_r = 0.19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07}$$
(4.5.6)

em que:

$z_{0,II}$  é igual a 0.05.

- Fator de pico ( $k_p$ ) [Anexo B.2(3)]:

$$k_p = \sqrt{2 * \ln(v * T)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 * \ln(v * T)}} ; T = 600$$
(4.5.7)

em que:

$v$  é a frequência de passagens ascendentes, dada pela expressão (4.5.8).

$T$  é a duração de integração da velocidade média do vento, de valor igual a 600 segundos.

$$v = n_{1,x} * \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} , v \geq 0.08 \text{ Hz}$$
(4.5.8)

- Coeficiente de resposta quase estática ( $B^2$ ) [Anexo B.2(2)]:

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0.9 * \left(\frac{b + h}{L(zs)}\right)^{0.63}}$$
(4.5.9)

em que:

$b, h$  é a largura e altura da construção, respetivamente (Figura 4.3);

$L(zs)$  é a escala de turbulência, que representa a dimensão média dos turbilhões do vento natural, sendo calculada pela expressão (4.5.10).

$$L(z) = L_t * \left(\frac{z}{z_t}\right)^\alpha , \text{ se } z \geq z_{min}$$

$$L(z) = L(z_{min}), \text{ se } z < z_{min}$$
(4.5.10)

em que:

$z_t$  representa a altura de referência, de valor 200m;

$L_t$  é a escala de referência, de valor de 300m;

$\alpha$  é igual a  $(0.67 + 0.05 * \ln(z_0))$ ;

$z_0$  e  $z_{min}$  são definidos no Quadro 4.3.

- Coeficiente de resposta em ressonância ( $R^2$ ) [Anexo B.2(5)]:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 * \delta} * S_{L(zs, n1, x)} * R_{h(n_h)} * R_{b(n_b)} \quad (4.5.11)$$

em que:

$S_{L(zs, n1, x)}$  é a função de densidade espectral de potência adimensional, que expressa a distribuição da energia do vento em frequência, sendo calculada pela expressão (4.5.12) [Anexo B.1(2)];

$R_h, R_b$  são as funções de admitância aerodinâmica, calculadas pelas expressões (4.5.13) e (4.5.14), respetivamente [Anexo B.2(6)];

$\delta$  é o decremento logarítmico total de amortecimento [Anexo F.5(1)] (equação (4.5.15)).

$$S_L(z, n) = \frac{n_k * S_v(z, nk)}{\sigma_v^2} = \frac{6.8 * f_L(z, n)}{(1 + 10.2 * f_L(z, n))^{5/3}} \quad (4.5.12)$$

em , que:

$f_L(z, n1x)$  é igual a  $(\frac{n_{1,x} * L(z)}{v_m(z)})$

- Cálculo da frequência fundamental  $n_{1,x}$

A frequência fundamental foi retirada diretamente do primeiro modo de vibração, da análise modal calculada pelo software “*Robot Structural Analysis Professional 2018*”. O valor extraído do software foi 1.59 Hz.

Esta etapa foi direta, pois o modelo do caso em estudo foi disponibilizado.

- Cálculo de  $R_h$  e  $R_b$  (Funções de admitância):

$$R_h = \frac{1}{n_h} - \frac{1}{2 * n_h^2} * (1 - e^{-2 * n_h}) \quad (4.5.13)$$

Com  $n_h = \frac{4.6 * h}{L(zs)} * f_L(z, n1, x)$

$$R_b = \frac{1}{n_b} - \frac{1}{2 * n_b^2} * (1 - e^{-2 * n_b}) \quad (4.5.14)$$

Com  $n_b = \frac{4.6 * b}{L(zs)} * f_L(z, n1, x)$

- Cálculo do decremento logarítmico total de amortecimento ( $\delta$ ) [Anexo F.5(1)]:

$$\delta = \delta_a + \delta_d + \delta_s \quad (4.5.15)$$

em que:

- $\delta_s$  é o decremento logarítmico de amortecimento estrutural, de valor igual a 0.05;
- $\delta_a$  é o decremento logarítmico de amortecimento aerodinâmico para o modo fundamental; calculado pela expressão (4.5.16) [Anexo F.5(3)];
- $\delta_d$  é o decremento logarítmico de amortecimento devido a dispositivos especiais, tais como, Tuned Mass Dumpers (TMD), tuned liquid dampers (TLD) ou sloshing tanks. Este valor deverá ser obtido através de métodos adequados, teóricos ou experimentais.

$$\delta_a = \frac{c_f * \rho * b * v_m(zs)}{2 * n_1 * m_e} \quad (4.5.16)$$

em que:

- $c_f$  é o coeficiente de força definido em (4.6);
- $\rho$  é a densidade do ar, de valor recomendado igual a 1,25 kg/m<sup>3</sup>;
- $b$  é a largura média da construção;
- $n_1$  é a frequência natural de vibração da estrutura no primeiro modo;
- $m_e$  é a massa equivalente por unidade de comprimento, calculado pela expressão (4.5.17) [Anexo F.4(1)].

$$m_e = \frac{\int_0^L m(s) * \Phi_1^2(s) ds}{\int_0^L \Phi_1^2(s)} \quad (4.5.17)$$

em que:

- $\Phi_1(s)$  é igual a  $1 - \cos(\frac{\pi * z}{L})$ ;
- $m$  é a massa por unidade de comprimento.

O EC1, aconselha para secções não constantes em altura, um valor de massa equivalente igual á massa a 1/3 da altura. Pelos meus cálculos a massa equivalente deu 81.1 Kg por unidade de comprimento.

#### 4.3.2. CÁLCULO DO COEFICIENTE DE FORÇA $c_f$ [SECÇÃO 7.11]

$$c_f = c_{f,0} * \psi\lambda \quad (4.6)$$

em que:

- $\psi\lambda$  é o coeficiente de efeitos de extremidade;
- $c_{f,0}$  é o coeficiente de força;



O coeficiente  $c_{f,0}$  é obtido pelos gráficos da Figura 4.4, para secções circulares, como é o caso da torre em questão estudada.

O coeficiente de força  $c_{f,0}$ , depende do índice de vazios ( $\varphi$ ),  $\varphi$  é calculado pela expressão

$$\varphi = \frac{A_c}{A}, \text{ em que } A_c = b \cdot l \text{ e } A \approx \sum b_i \cdot l_i + \sum A_{gk} \text{ (Figura 4.3).}$$

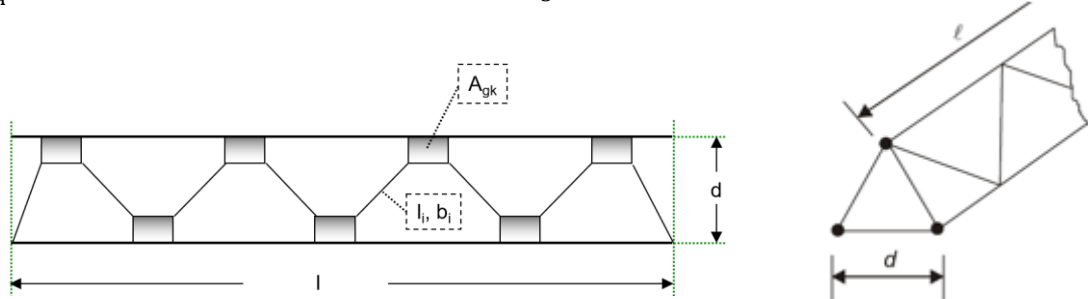


Figura 4.3-Definição  $A_{gk}$ ,  $l_i$ ,  $b_i$ ,  $l$ ,  $b$  segundo EC1-1-4 [Secção 7.11(2)]

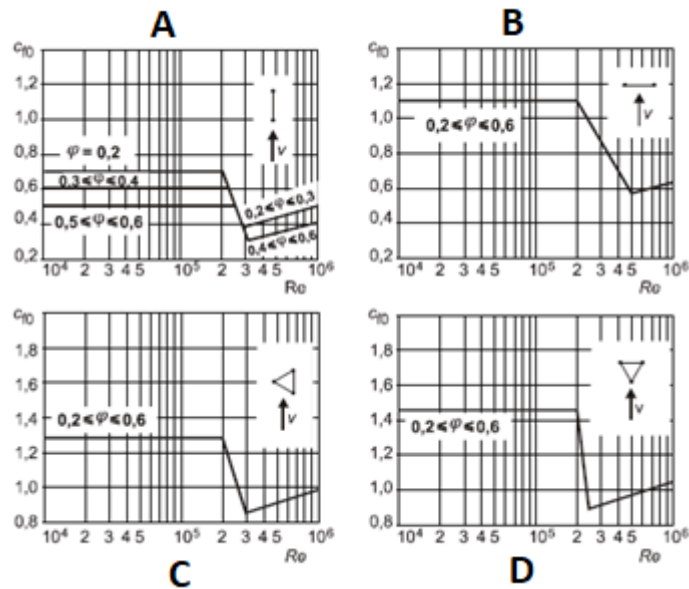


Figura 4.4-Coeficiente de força  $c_{f,0}$  para estruturas treliçadas constituídas por elementos de secção

$$\text{transversal circular -EN1991-1-4, } Re(\text{número de Reynolds}) = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot p}{\rho}}$$

Quando se abordam as travessas, o coeficiente de força  $c_{f,0}$  é o do caso D da Figura 4.4. No caso das diagonais ou montantes, trata-se do caso B da Figura 4.4.

Com a ajuda da Figura 4.5, sabe-se o valor do coeficiente de efeitos de extremidade  $\psi_\lambda$ . Como o índice de vazios irá rondar os 0.1-0.2, considerou-se  $\psi_\lambda=1$  (caso mais desfavorável).

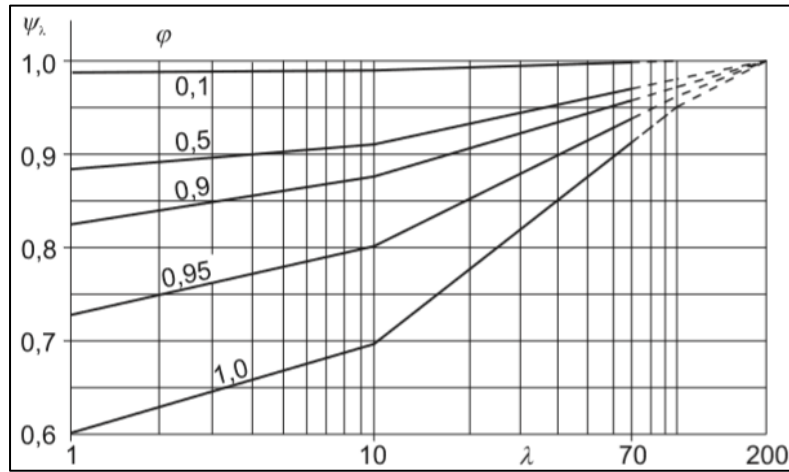


Figura 4.5-Valores indicativos do coeficiente de efeitos de extremidade  $\psi_\lambda$  em função do índice de cheios  $\phi$  e da esbelteza  $\lambda$

#### 4.3.3. CÁLCULO DO COEFICIENTE PRESSÃO DINÂMICA DE PICO $q_p(z)$ [SECÇÃO 4.5(1)]:

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z) \quad (4.7)$$

Este coeficiente é calculado em função da densidade do ar ( $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ ) e dos coeficientes  $I_v(z)$ ,  $v_m(z)$  das expressões (4.5.1) e (4.5.2) respetivamente, conforme a altura em análise.

#### 4.4. MÉTODO DE SHINOZUKA

A ação do vento pode ser também calculada pelo método simplificado da EN 1991-1-4 [Secção 8.3.2], equação (4.8).

$$F(t) = \frac{1}{2} * \rho * c_f * A * [U(z) + u(t)]^2 \quad (4.8)$$

Através do método de Shinozuka ([22] , [23]) consegue-se calcular a parcela do vento dinâmica  $u(t)$  (equação (4.9)), que é a parcela que inclui a variação do vento ao longo do tempo.

$$u(t) = \sqrt{2} * \sum_{k=1}^N \sqrt{S_v(z, n) * \Delta n} * \cos(2\pi n t + \Phi k) \quad (4.9)$$

em que:

- $S_v(z, n)$  é calculado pela expressão (4.5.12), para cada  $n = nk + \Delta n$ . Basicamente está a ser acumulado os valores do espetro da Figura 4.6, na fórmula (4.9);
- $\Phi k$  é um ângulo de fase gerado aleatoriamente entre 0 e  $2\pi$ ;
- $\Delta n$  é igual a  $\frac{n_{máx} - n_{min}}{N}$ , sendo  $n_{min}$  igual a 0.01 e o  $n_{máx}$  um valor de frequência para o qual aproximadamente o valor da densidade espectral é similar ao valor que esta quantidade assume para o  $n_{min}$ ;
- $N$  é o nº de parcelas que o gráfico Figura 4.6 é dividido;
- $t$  é o instante de tempo que a carga turbulência está a ser calculada.

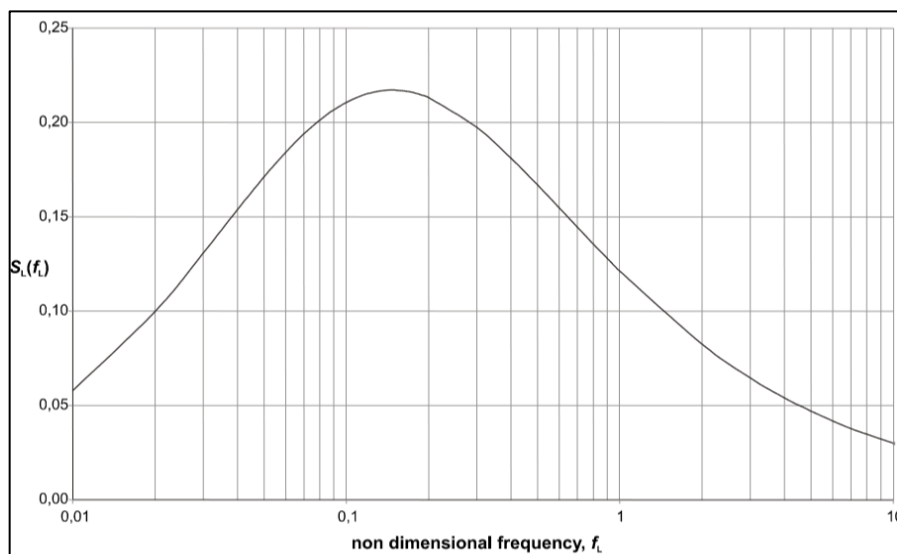


Figura 4.6- Função de densidade espectral de potência  $S_L(f_L)$

Inicialmente foi realizada uma tentativa de implementação da fórmula (4.9) no visual basic do Excel (Anexo B), mas os valores utilizados foram os do website [24] que têm em conta outros parâmetros importantes como a coerência espacial, que irá ser explicado melhor o seu efeito no capítulo 5.

No artigo [23] é mencionada a metodologia para a simulação de series temporais de vento natural, e também é apresentado um método simplificado para quantificação da ação dinâmica sobre torres treliçadas de grande altura. Tais conhecimentos permitiram comparar as respostas dinâmicas de uma torre eólica de 150 metros de altura, sem e com dispositivo passivo de atenuação de vibrações TMD).

A investigação anterior inseriu-se no projeto VHSSPoles (Very High Strength Steel Poles) em co-promoção com indústria (Barros - [25]) através da empresa Metalogalva, S.A. (Trofa, Portugal) que primordialmente abordou entre 2012-2015 a temática dos postes e apoios tubulares para torres de transmissão e afins. E de que a abordagem da presente tese poderá ser interpretada como uma mais-valia sobre a temática das torres de transmissão. Indiretamente a referência Henriques e Barros [23] também constitui uma extensão do projeto internacional COVICOCEPAD coordenado por Barros [26], com mais-valias recentes de controlo de vibrações recorrendo a dispositivos magneto-reológicos (Corbi e Barros - [27]).

#### 4.5. EFEITO DE RAJADA

O efeito de rajada é implementado pela fórmula (4.10).

$$F_{T,W}(z) = F_{m,W}(z) \cdot \left[ 1 + \left[ 1 + 0,2 \cdot \left( \frac{z_m}{h} \right)^2 \right] \cdot \frac{[1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot c_s c_d - 1}{c_o(z_m)} \right] \quad (4.10)$$

Onde  $F_{m,w}$  é a força do vento estática ( $u(t)=0$ ), calculada pela fórmula simplificada (4.8).

#### 4.6. ANÁLISE ESTÁTICA LINEAR E ANÁLISE ESTÁTICA NÃO LINEAR

A análise estática linear pressupõe que a resposta às cargas induzidas é uma resposta linear, ou seja, se a carga aplicada for a dobrar, os deslocamentos, deformações, tensões, forças de reação, também irão ser a dobrar (Figura 4.7).

Mas nem sempre, esta análise linear é possível, devido por exemplo à não linearidade dos materiais constituintes da torre, das condições de contacto, ou de grandes deslocamentos. Considerando esta última fonte de não linearidade como a de interesse imediato para o caso de estudo, os designados efeitos P-  $\Delta$  serão considerados através da determinação da matriz de rigidez total da estrutura como a diferença entre a matriz de rigidez elástica e a matriz de rigidez geométrica.

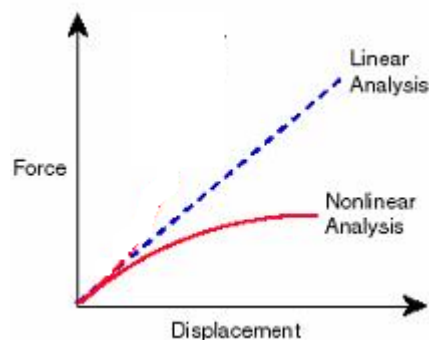


Figura 4.7- Análise elástica e análise estática não linear

Os efeitos P-Δ da Figura 4.8, existem devido à excentricidade inicial das cargas verticais. Esta excentricidade provoca um momento fletor.

Os efeitos P-δ são instabilidades locais relacionadas com as ligações à extremidade e imperfeições geométricas (Figura 4.8).

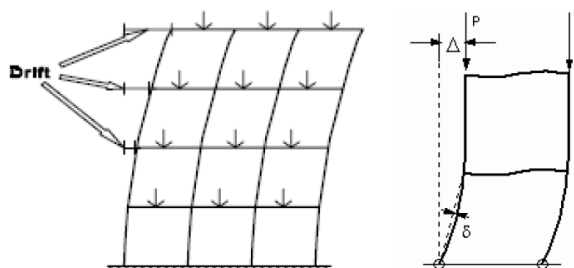


Figura 4.8-Efeitos P- Δ e P- δ - [28]

Sabemos que as forças são iguais á matriz de rigidez multiplicada pelos deslocamentos nodais:

$$F=k*\delta \quad (4.11)$$

Sendo a matriz k igual á matriz de rigidez elástica ( $k_e$ ) subtraída pela matriz geométrica ( $k_g$ ), resulta a fórmula:

$$F=(k_e-k_g)* \delta \quad (4.12)$$

As matrizes ( $k_e$ ) e ( $k_g$ ) são apresentadas na Figura 4.9, para uma barra simples com esforço axial e momento fletor.

Este efeito irá alterar as matrizes de rigidez geradas pelo software “*Robot Strucutural Analysis Professional 2018*”. O software irá ser realizada a assemblagem para todas as barras constituintes da estrutura.

$$K_e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad K_g = N \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6}{5L} & \frac{1}{10} & 0 & -\frac{6}{5L} & \frac{1}{10} \\ 0 & \frac{1}{10} & \frac{2L}{15} & 0 & -\frac{1}{10} & -\frac{L}{30} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{6}{5L} & -\frac{1}{10} & 0 & \frac{6}{5L} & -\frac{1}{10} \\ 0 & \frac{1}{10} & -\frac{L}{30} & 0 & -\frac{1}{10} & \frac{2L}{15} \end{bmatrix}$$

Figura 4.9- Matriz de rigidez elástica ( $k_e$ ) e Matriz de rigidez geométrica ( $k_g$ ) - [28]

#### 4.7. ANÁLISE MODAL

Considerando uma estrutura sem amortecimento, a equação do movimento livre é a seguinte:

$$[M] \cdot \{\ddot{u}(t)\} + [K_e] \cdot \{u\} = 0 \quad (4.13)$$

A solução desta equação é a vibração livre variando harmonicamente com o tempo (por exemplo, sinusoidalmente):

$$\{u\} = \{u_0\} \cdot \sin(\omega t) \quad (4.13.1)$$

em que:

$\{u_0\}$  é um vetor de amplitudes do movimento em cada grau de liberdade;

$\omega$  é a frequência de vibração natural da estrutura.

Sabendo que a segunda derivada da deformada é igual a  $u = -u_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)$ , substituindo-a na equação (4.13), resulta:

$$\begin{aligned} & -[M] \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t) + [K] \cdot u_0 \sin(\omega t) \\ & (=) \\ & ([K] - \omega^2 \cdot [M]) \cdot \{u_0\} = [0] \end{aligned} \quad (4.13.1)$$

A solução da equação (4.13.1) é uma solução indeterminada, porque traduz um sistema de equações homogêneo (2º membro nulo), que tem solução trivial não significativa.

É condição necessária e suficiente para existir solução não nula que:

$$\det([K] - \omega^2 \cdot [M]) = 0 \quad (4.13.2)$$

designada de equação característica que permite determinar as frequências próprias da estrutura ( $\omega_i^2$ , para  $i=1 \dots n$ ).

Existirão tantos vetores de amplitudes  $u_0$  quantas frequências angulares próprias.

Esse vetor habitualmente designado de modo de vibração representa-se pelo vetor  $\phi$ . Portanto a cada solução  $\omega_i^2$  corresponde o modo de vibração  $\phi_i$ .

Coletivamente poder-se-á então escrever que:

$$([K] - \omega_i^2 \cdot [M]) \cdot \phi_i = 0, \text{ para } i=1 \dots n \quad (4.13.3)$$

Cada  $\phi_i$  é de amplitude indeterminada, e, portanto, representam proporção de componentes de vetores respetivos, ou seja, proporção de amplitudes de vibração de cada grau de liberdade do modo  $i$  considerado.

$$\Phi_i = \begin{Bmatrix} \phi_{1i} \\ \phi_{2i} \\ \phi_{3i} \\ \dots \\ \phi_{ni} \end{Bmatrix}$$

#### 4.8. ANÁLISE TEMPORAL

A análise temporal é usada para determinar a resposta dinâmica da estrutura.

Esta análise tem por base a equação de movimento (4.14):

$$M \cdot \ddot{u}(t) + C \cdot \dot{u}(t) + K_{tot} \cdot u = R(t) \quad (4.14)$$

em que:

M é a matriz de massa diagonal;

u é o vetor de deslocamento ao longo do tempo, dos graus de liberdade da estrutura;

$\dot{u}$  é o vetor velocidade ao longo do tempo, dos graus de liberdade da estrutura;

$\ddot{u}$  é o vetor aceleração ao longo do tempo, dos graus de liberdade da estrutura;

C é a matriz de amortecimento,  $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$ ;

$K_{tot}$  é a matriz de rigidez total da estrutura ( $K_e - K_g$ );

R(t) é o vetor do carregamento imposto nos graus de liberdade da estrutura.

A resolução desta equação permite obter, para cada instante de tempo, os deslocamentos que a estrutura sofre devido à solicitação, e consequentes velocidades e acelerações, através de processos de derivação.

Por se tratar de uma análise dinâmica com inclusão de não linearidades geométricas, serão determinadas as soluções temporais por algoritmia apropriada do “*Robot Structural Analysis*” nomeadamente integração numérica da equação diferencial de movimento (4.14) acima, através do método de Newmark

## 4.9. VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA

### 4.9.1. CLASSIFICAÇÃO DA SECÇÃO -EN1993-3-1

Antes de realizar as verificações de segurança à encurvadura, será necessário classificar as secções para decidir quais os tipos de verificações a realizar.

A norma permite proceder a uma análise elástica para todas as classes e a uma análise plástica global para secções de classe 1 ou 2 (Figura 4.10).

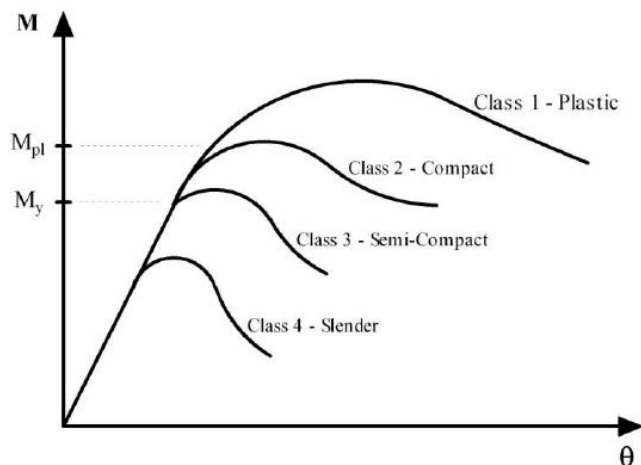
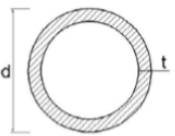


Figura 4.10-Classificação de secções transversais de acordo com o EC3 parte 3

Caso a secção seja classificada como classe 4, ter-se-ia de considerar a área efetiva da secção.

As secções em forma de cantoneiras e circular, o programa limita a classificação da secção a classe 3, podendo realizar uma análise menos económica no caso de a secção real ser de classe 4.

							
Classe	Secção em flexão e/ou compressão						
1	$d/t < 50\epsilon^2$						
2	$d/t < 70\epsilon^2$						
3	$d/t < 90\epsilon^2$						
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	<b>f<sub>y</sub> Mpa</b>	<b>235</b>	<b>275</b>	<b>355</b>	<b>420</b>	<b>460</b>	
	$\epsilon$	1	0,924	0,814	0,748	0,715	
	$\epsilon^2$	1	0,855	0,662	0,560	0,511	

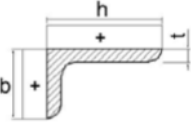
Classe	Secção comprimida
Distribuição das tensões	
3	$h/t \leq 15\epsilon : \frac{b+h}{2t} \leq 11.5\epsilon$

Figura 4.11-Classificação de secções tubulares e cantoneiras



#### 4.9.2. FLEXÃO COM ESFORÇO TRANSVERSO

$$V_{sd} = 0.5 * V_{pl,rd} = \frac{0.5 * A_v * f_{yd}}{\sqrt{3} * \gamma_{m0}} \quad (4.15)$$

em que:

$A_v$  é a área da secção transversal;

$\gamma_{m0}$  é o coeficiente de segurança parcial, de valor 1.

#### 4.9.3. FLEXÃO COM ESFORÇO AXIAL

Segundo o EN1993-3-1 (2004), é necessário verificar o estado limite de encurvadura por varejamento:

$$\frac{N_{sd}}{\chi * A * f_{yd}} + \frac{M_{sd}}{W_{el} * \frac{f_{yd}}{\gamma_{M1}}} \leq 1.0 \quad (4.16)$$

em que:

$N_{sd}$  é o esforço axial atuante;

$M_{sd}$  é o momento fletor atuante;

$A$  é a área de secção transversal;

$w_{el}$  é o módulo de flexão elástico da secção transversal;

$f_{yd}$  é a tensão de cedência;

$\gamma_{M1}$  é o coeficiente de segurança parcial, de valor 1;

$\chi$  é o fator de redução para o modo de encurvadura de varejamento, dado pela expressão (4.17).

$$\chi = \frac{1}{(\Phi + \sqrt{(\Phi^2) - \bar{\lambda}^2})} \quad (4.17)$$

em que:

$\Phi$  é igual a  $\frac{1}{2} * [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2]$ , sendo  $\alpha$  determinado pela tabela do Quadro 4.4.

$\bar{\lambda}$  é o coeficiente de esbelteza adimensional  $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{\frac{le}{i}}{93.9 * \varepsilon}$ , sendo  $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yd}}}$ , le o comprimento de encurvadura e i o raio de giração.

Quadro 4.4- Fator de imperfeição

Curva de encurvadura	a0	a	b	c	d
Fator de imperfeição $\alpha$	0.13	0.21	0.34	0.49	0.76

O efeito da encurvadura poderá ser desprezado, caso  $\bar{\lambda} \leq 0,2$  ou  $\frac{N_{ed}}{N_{c,rd}} \leq 0,04$ .

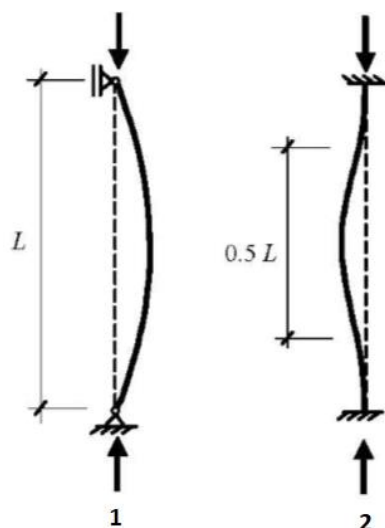


Figura 4.12-comprimentos de encurvadura para barras articuladas (1) e barras reticuladas (2)

Quanto maior o comprimento de encurvadura, maior é o coeficiente de esbelteza e maior é o fator de redução. Quanto menor o fator de redução, mais rapidamente a equação (4.16) se aproxima do valor 1.

Na verdade, não existem encastramentos perfeitos, e por não existirem não será atribuído um comprimento de encurvadura de valor 0.5 a barras reticuladas.

De acordo com Barros [29], [30], [31], [32] e [33] que calcula comprimentos de encurvadura reais em vigas coluna espaciais com deformações e excentricidades iniciais e de secção circular, como é o caso de estudo, conclui-se que o comprimento de encurvaduras destas situa-se num intervalo entre [0.7-0.9] metros. Com base nisto, nesta dissertação ir-se-á representar dois cenários, um com comprimento de encurvadura 0.8 nos montantes e 0.9 nas travessas e outro com 0.7 nos montantes e 0.8 nas travessas.

No último caso, os montantes possuem um comprimento de encurvadura menor que as travessas, novamente porque são mais rígidos, encurvando menos facilmente.

#### 4.10. ANÁLISE DE FIABILIDADE

Uma variável aleatória é uma variável cujo valor é incerto ou não determinístico, como a tensão de cedência do aço, ou qualquer outro material e quantidade física. Existem dois tipos de variáveis aleatórias, uma variável aleatória discreta, definida como um valor inteiro, cuja probabilidade é dada pela função (discreta) de massa de probabilidade (PMF). O outro tipo de variável aleatória é a variável aleatória contínua definida como um valor de um intervalo de números reais, cuja probabilidade é dada pela função densidade de probabilidade (PDF).

Se a forma da função de distribuição e seus parâmetros associados forem especificados, os parâmetros estatísticos, valor médio, variância e desvio padrão e coeficiente de variação de uma variável aleatória são conhecidos.

##### 4.10.1. FUNÇÕES DE PROBABILIDADE

Maior parte das funções de probabilidade usadas na área de engenharia civil utilizam uma distribuição normal. Para além dessa às vezes também são utilizadas distribuições logonormais.

A função de probabilidade para uma distribuição normal é dada pela fórmula:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (4.18)$$

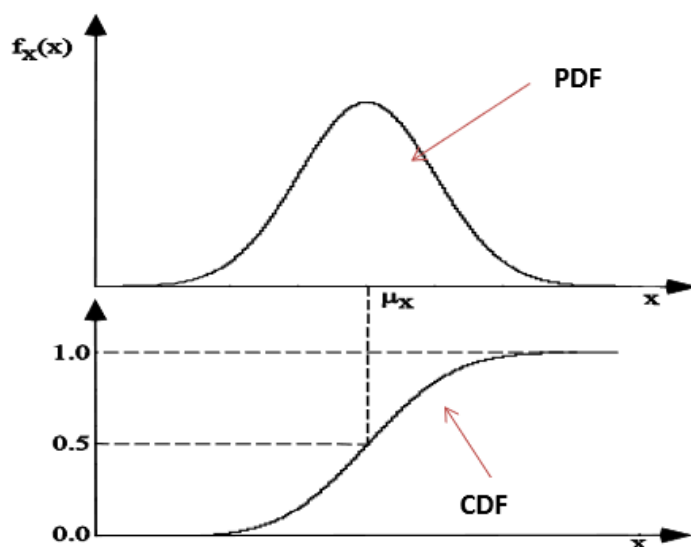


Figura 4.13-Função de probabilidade e sua cumulativa para uma distribuição normal - [5]

##### 4.10.2. FUNÇÃO DE ESTADO LIMITE (G)

A função de estado limite é dada função que subtrai a capacidade resistente da estrutura (R) pelas cargas aplicadas(Q):

$$g(R,Q)=R-Q \quad (4.19)$$

#### 4.10.2.1. Índice de fiabilidade( $\beta$ )

O índice de fiabilidade é basicamente uma medida de segurança, mais concretamente um índice de segurança. Por essa perspetiva quanto maior for o índice ( $\beta$ ), maior é a segurança da estrutura.

O índice de fiabilidade é dado pela expressão:

$$\beta = \frac{\mu R - \mu Q}{\sqrt{\sigma R^2 + \sigma Q^2}} \quad (4.20)$$

Resumindo, quando a função  $g$  é menor que 0 a estrutura falha (área sombreada no gráfico da Figura 4.14). A função que representa a probabilidade de a estrutura falhar é igual à função de distribuição menos o índice de fiabilidade.

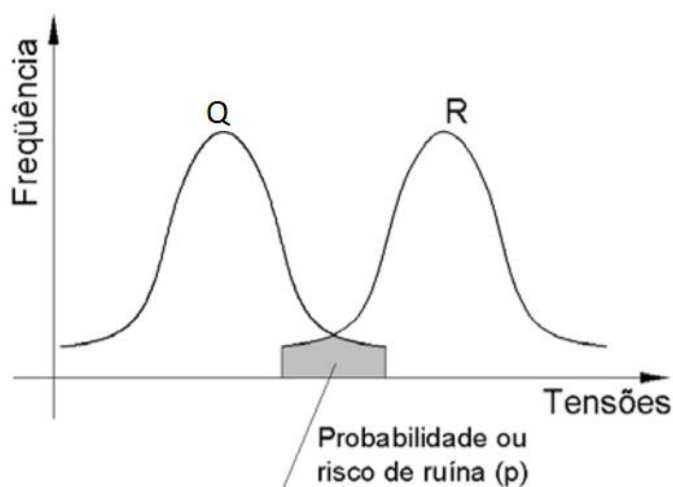


Figura 4.14-Base dos métodos probabilísticos em estruturas - [34]

Já existem vários estudos sobre este tema, então já são conhecidos os parâmetros estatísticos das cargas aplicadas (Quadro 4.5) e capacidade resistente (Quadro 4.6).

Quadro 4.5 - Parâmetros estatísticos das cargas aplicadas - [35]

Parâmetros	Fator "bias" ( $\lambda_b$ )	Coeficiente de variação (V)
Peso próprio e sobrecargas	1.05	0.1
Vento	0.78	0.37

Quadro 4.6 - Parâmetros estatísticos da resistência do membro - [36]

Parâmetros	Fator "bias" ( $\lambda_b$ )	Coeficiente de variação (V)
Resistência do membro	1.2	0.092

A média usada no cálculo do índice de fiabilidade é então dada por:  
em que:

$$\mu = \lambda_b * N \quad (4.21)$$

$\lambda_b$  é o fator “*bias*” dos quadros 4.5 e 4.6, conforme o parâmetro em causa;

N é o valor nominal do parâmetro em causa.

O respetivo desvio padrão é calculado pela fórmula:

$$\sigma = V * \mu \quad (4.22)$$

em que:

V é o coeficiente de variação dos Quadro 4.5 e Quadro 4.6 conforme o parâmetro em causa;

$\mu$  é a média calculada na equação (4.21).



# 5

## MODELAÇÃO DA TORRE METÁLICA EM ESTUDO

Este capítulo aborda os resultados sobre o efeito de corrosão em torres metálicas para um caso de estudo.

As torres metálicas atuais são principalmente galvanizadas (ou com proteção de pinturas especiais), e porque as torres metálicas não protegidas foram projetadas e construídas até meados do século XX, torna-se mais difícil abordar um caso real ainda operacional. Face à degradação e até já à não operacionalidade dessas eventuais torres metálicas, algumas já se encontram em fase de substituição (que era para ser o caso real em estudo, se não fosse esse percalço).

Assim a torre metálica aqui abordada terá as dimensões de uma real atual em aço galvanizado, mas supostamente não galvanizada, ou seja sem proteção.

Essa torre metálica foi inicialmente pré-dimensionada pela Metalgalva, para uma localização junto a Peniche e o seu cálculo foi verificado e validado pelo orientador e co-orientador, através da elaboração de um relatório interno confidencial para o Instituto da construção (Abril 2018).

### 5.1.INTRODUÇÃO

As etapas da Figura 5.1, foram o procedimento tomado na análise, para uma melhor caracterização da realidade.

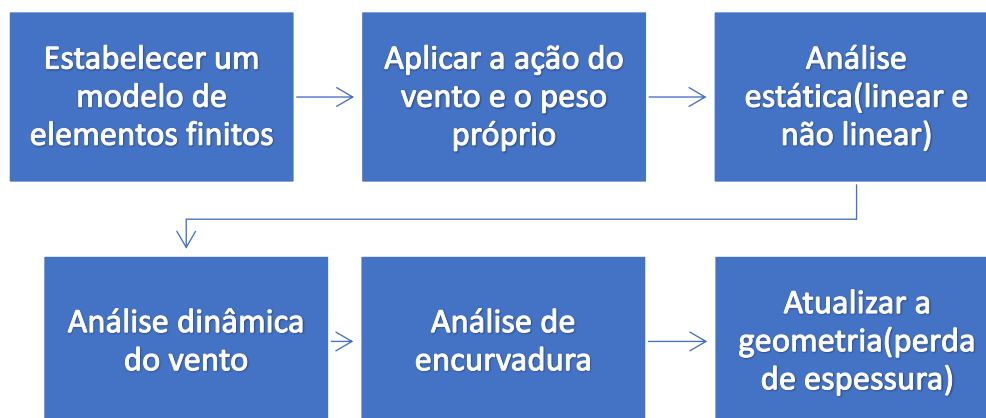


Figura 5.1-Processo de modelação de um FEM - [37]

## 5.2. CONSIDERAÇÕES REALIZADAS

As barras constituintes da torre, estão conectadas entre si nos nós considerados rígidos, de modo a representar o comportamento à flexão e a transmissão de forças.

Na caracterização do peso das linhas de alta tensão, antes de ser fornecido o modelo, pensou-se em usar pontos de massa acoplados no encontro das linhas com a torre, conforme utilizado em alguma bibliografia [38].

O peso das linhas está a ser considerado na modelação através de uma força adicional horizontal nos painéis de vento, conforme facultado nos desenhos e memória da torre em estudo fornecidos pela Metalgalva.

A torre é constituída por 3 tipos de elementos estruturais: montantes, diagonais e travessas (Figura 5.2).

Estes vários elementos têm comportamentos diferentes face ao esforço imposto, conforme o dimensionamento efetuado. Este assunto vai ser tratado mais á frente no subcapítulo (5.9.2).

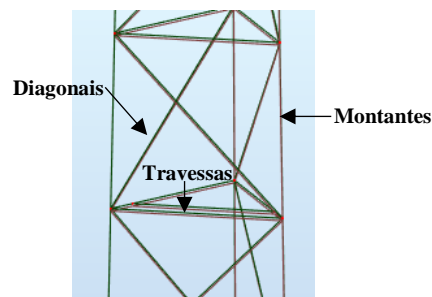


Figura 5.2-Elementos estruturais de uma torre metálica

## 5.3. HIPERESTATICIDADE

Uma característica do modelo fornecido que é relevante para este tópico, é o facto de os montantes no modelo terem sido colocados como foram montados, ou seja um montante segura 3 níveis.

Para o modelo fornecido, a equação ( $N^{\circ}$  incógnitas= $N^{\circ}$  equações de equilíbrio), fica 234\*hiperestática:

$$\begin{aligned} 3*3 \text{ apoios} + 1*81 \text{ diagonais} + 6*27 \text{ montantes} + 6*81 \text{ travessas} &= 6*84 \text{ nós} \\ (=) \\ 738 &> 504 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Um modelo correto seria um montante por patamar, que resulta 558 graus de hiperestaticidade:

$$\begin{aligned} 3*3 \text{ apoios} + 1*81 \text{ diagonais} + 6*81 \text{ montantes} + 6*81 \text{ travessas} &= 6*84 \text{ nós} \\ (=) \\ 1062 &> 504 \end{aligned} \quad (5.2)$$

A partir do momento que as barras vão deixando de funcionar, a estrutura perde graus de hiperestaticidade, podendo chegar a ficar hipostática, encontrando-se comprometida a estabilidade da estrutura nesse caso.



#### 5.4. PROPRIEDADES DA ESTRUTURA ORIGINAL

No Quadro 5.1, temos os vários tipos de seções empregadas aos vários tipos de barras, montantes, travessas e diagonais. Também é indicado o painel em que estão inseridas na Figura 5.5, importante para o cálculo da ação do vento e para situar as barras que não verificam à segurança.

Quadro 5.1- Propriedades das barras

Nome da secção	Barras	Tipo
CAEP 50x4	1 32 57 87 117	Inúteis apenas para aplicação do peso da escada
CAEP 60x4	147 177 312 314 316	Inúteis apenas para aplicação do peso da escada
CIRC 48.3x3	4to15 35to46 65to67 71to76 95to103 125to127 131to136 155to163 185to187 256to261 274to276 279to284	Travessas-Painel 1,2,3,4,5,6,7,8
CIRC 60.3x3	16to21 24to29 300to302	Diagonais - Painel 1 Travessas Painel 9
CIRC 76.1x3	47to56 59 60 77to79 81to83 85 86 89	Diagonais-Painel 2 e 3
CIRC 88.9x3	23 62 68 69 108to110 112to114 116 119 120 122 128to130 137to146 148to150 168to170 172to174 176 179 180	Montantes - Painel 1 Diagonais -Painel 4,5 e 6
CIRC 101.6x3	262to264 266to268 270to272 289to291 293to295 297to299	Diagonais - Painel 7 e 8
CIRC 114.3x4	306 308 310	Diagonais – Painel 9
CIRC 133x4	70 80 84 90 92 104to107 111 115 118	Montantes- Painel 2
CIRC 177.8x5	2 3 30 31 33 34 152 164 165	Montantes-Painel 3
CIRC 193.7x6	166 167 171 175 178 181to184	Montantes-Painel 4
CIRC 193.7x8	188to196	Montantes-Painel 5
CIRC 193.7x10	197to205	Montantes-Painel 6
CIRC 219.1x10	206to208 212to214 218to220	Montantes-Painel 7
CIRC 244.5x10	209to211 215to217 221to223	Montantes-Painel 8
CIRC 244.5x12	246 249 252	Montantes-Painel 9

## 5.5. FORÇAS

### 5.5.1. PESO PRÓPRIO E SOBRECARGAS

À primeira vista estas forças poderiam não parecer um aspeto importante a considerar, pois todas as torres apresentam peso próprio e algumas sobrecargas. Mas esta torre é uma torre especial utilizada para vigia da costa portuguesa, e possui muitos equipamentos em algumas plataformas a cotas específicas e também uma escada. Consequentemente existem muitas sobrecargas no modelo, que vão comprometer a capacidade vertical.

Este aspeto deveria ter sido tido em conta no dimensionamento dos montantes, pois eles têm de assegurar a capacidade da estrutura.

Para um dimensionamento otimizado, os primeiros elementos a falhar deveriam ser as diagonais, seguidamente as travessas e só no fim os montantes. O facto de os montantes poderem ser os primeiros a falhar, induzirá que toda a estrutura colapse sequencialmente; caso que não aconteceria, se as diagonais fossem usadas como os fusíveis estruturais, isto é as primeiras barras a falharem.

Para que um dimensionamento seguro se concretize, é necessário que os montantes tenham rigidez suficiente, para suportar as cargas verticais; tal aspeto consegue-se implementando um aumento de secção.

O que ocorreu no modelo desta torre, na análise de encurvadura, foi que os primeiros tipos de barras a falhar são montantes; tal deve-se ao já referido, um dimensionamento não otimizado (Figura 5.3).

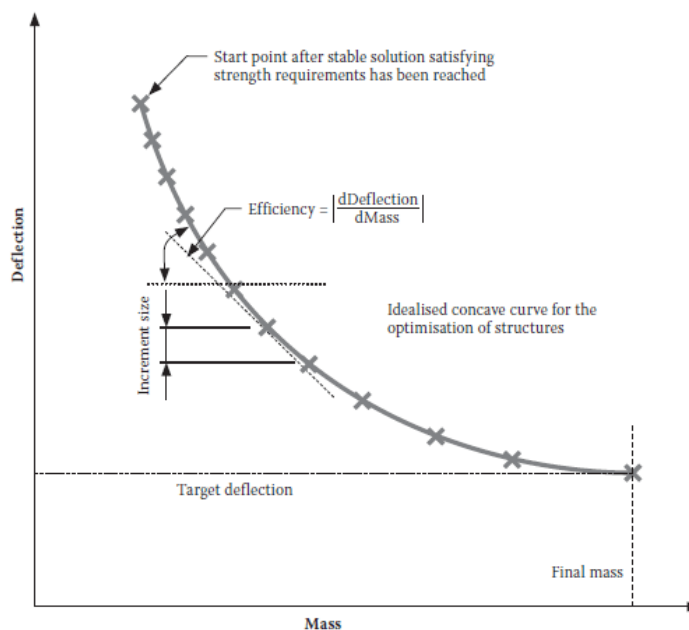


Figura 5.3-Curva de otimização - [39]

### 5.5.2. FORÇA DO VENTO

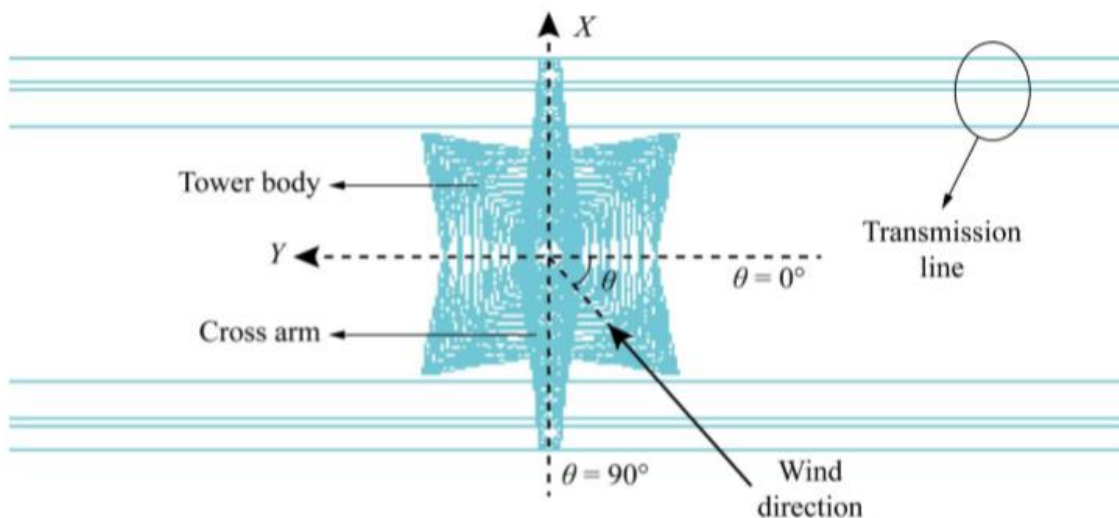


Figura 5.4-Definição do ângulo de ataque - [40]

Por estudos mencionados na bibliografia [40], chega-se à conclusão que a inclinação da carga do vento mais desfavorável ocorre para  $\theta$  igual a  $90^\circ$  e a mais favorável para  $\theta$  igual a  $0^\circ$ ; por isso todas as cargas do vento neste modelo estarem aplicadas perpendicularmente à secção transversal.

Analisando a torre em altura, supõem-se a divisão em 9 painéis, para o cálculo do coeficiente de força para a ação do vento.

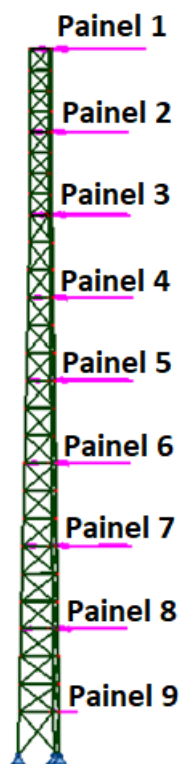


Figura 5.5- Divisão em altura da análise da torre

No cálculo do coeficiente estrutural não é necessária uma análise por painéis; apenas é indicado o cálculo dos parâmetros para uma altura de referência, e neste caso faz sentido, pois toda a estrutura deve entrar no cálculo, logo a divisão em painéis não é aconselhada.

Quadro 5.2-Parâmetros da ação do vento para a altura de referência

Parâmetros da ação do vento para a altura de referência			
Velocidade básica do vento	$v_b =$	27.8	m/s
Altura de referência	$z_s =$	30	m
Velocidade média	$v_m(z_s) =$	38.97	m/s
Intensidade turbulenta	$I_v(z_s) =$	0,12	
Escala de turbulência	$L(z_s) =$	130.26	m
Função de densidade espectral de potência adimensional	$S_L(z_s, n) =$	0.045	
Frequência adimensional	$f_L(z_s, n) =$	5.28	
Coeficiente de resposta quase-estática	$B^2 =$	0,67	
Coeficiente de resposta em ressonância	$R^2 =$	0,031	
	$\eta_h =$	9.33	
	$\eta_b =$	0,46	
Função de admitância aerodinâmica	$R_h =$	0,1	
Função de admitância aerodinâmica	$R_b =$	0,75	
Fator de pico	$k_p =$	3,44	
Frequência de passagens ascendentes	$v =$	0,33	
Decremento logarítmico de amortecimento	$\delta =$	0,55	
Decremento logarítmico de amortecimento aerodinâmico	$\delta_a =$	0,5	
Decremento logarítmico de amortecimento estrutural	$\delta_s =$	0,050	
Massa equivalente por unidade de comprimento	$m_e =$	81.1	Kg/m
Coeficiente de força para a direção do vento	$c_f =$	1.08	
Coeficiente estrutural	$c_s c_d =$	0,92	

As forças aplicadas têm em conta as pressões atuantes e a área de influência correspondente a cada piso, considerando a velocidade média do vento em função da altura dada pela expressão (4.5.2) do subcapítulo 4.3.1.

$F_{w1}$  é a força do vento calculada pela expressão (4.4) do método complexo, e a força do vento  $F_{m,w}$  é calculada pela expressão (4.8) do método simplificado, ambas apresentadas no capítulo 4.

Analisando os resultados do Quadro 5.3, repara-se uma diferença considerável entre as forças calculadas pelos dois métodos. A diferença é justificada pela existência da parcela correspondente à contribuição da rajada, conforme explicito na expressão (4.10). A força de rajada é maior cerca de 28% do que  $F_{w1}$ .

Quadro 5.3- Resultados finais e parcelares da força do vento

Faixa	z	bmédio	Apainel	Atrav	A mont+diag	$\phi$
T1	50	1.7	10.03	1.91		0.19
T2	44.1	1.7	10.527	1.01	1.58	0.25
T3	38.3	1.93	12.0655	0.87	2.08	0.24
T4	32.4	2.16	13.195	1.04	2.27	0.25
T5	26.6	2.39	14.7795	1.12	2.27	0.23
T6	20.7	2.62	16.1365	1.2	2.27	0.22
T7	14.8	2.85	17.197	1.41	2.57	0.23
T8	9	3.08	18.526	1.51	2.87	0.24
T9	3.1	3.2	9.92	0.69	1.53	0.22

Faixa	z	$c_f$ trav	$c_f$ mont/diag	$v_m(z)$	$I_v$	$q_p(z)$	$F_{m,w}$	$F_{w1}$	$F_{T,w}(z)$	(%)
T1	50	1.41	1.08	41.45	0.11	1930.59	2.89	4.78	6.56	27.23
T2	44.1	1.41	1.08	40.84	0.12	1886.53	3.26	5.42	7.48	27.43
T3	38.3	1.41	1.08	40.16	0.12	1837.60	3.50	5.86	8.10	27.66
T4	32.4	1.41	1.08	39.34	0.12	1780.32	3.79	6.41	8.89	27.94
T5	26.6	1.41	1.08	38.38	0.12	1713.85	3.71	6.35	8.85	28.26
T6	20.7	1.41	1.08	37.16	0.13	1631.00	3.58	6.21	8.71	28.69
T7	14.8	1.41	1.08	35.53	0.13	1523.07	3.76	6.66	9.42	29.27
T8	9	1.41	1.08	33.11	0.14	1369.20	3.58	6.58	9.42	30.17
T9	3.1	1.41	1.08	27.92	0.17	1064.15	1.28	2.57	3.79	32.25

## 5.6.CENÁRIOS DE CORROSÃO

Na simulação da perda de espessura, como visto no gráfico da Figura 3.38, um intervalo de perda de espessura, está associado a um tipo de ambiente. Assim, corrosões maiores, derivam de poluentes ou presença de cloros e a restante (mais comum) devido à humidade.

Como já retratado no capítulo 3, as diferentes razões de corrosão, manifestam-se em alturas diferentes na torre. A corrosão derivada da poluição, ocorre nas zonas mais altas e a corrosão devido à humidade ocorre nas zonas inferiores, junta á base da torre.

Inicialmente pensou-se em considerar vários cenários de corrosão em altura, mas (após algumas simulações) finalmente decidiu-se representar uma perda de espessura uniforme em toda a altura, para simular um cenário mais desfavorável e menos confuso.

## 5.7. ANÁLISE MODAL

Pela Figura 5.6, conclui-se que praticamente todos os modos são de flexão global.

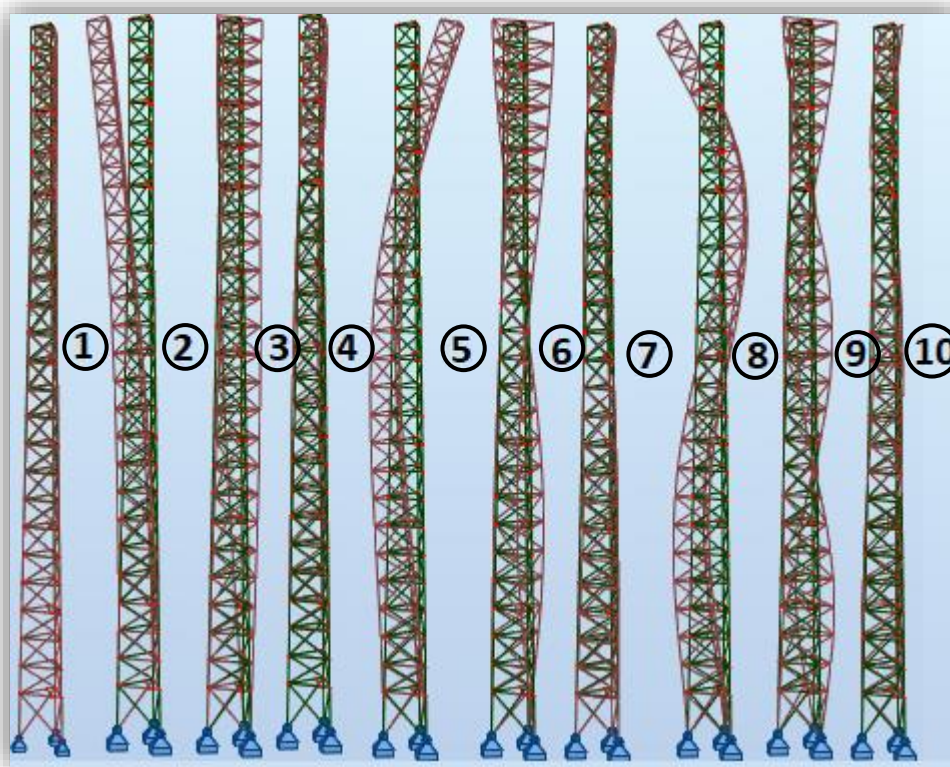


Figura 5.6-Configurações dos modos de vibração

Quanto maior for o modo de vibração, maior é a energia necessária para o excitar. Nessa lógica a frequência aumenta, com os modos de vibração (Quadro 5.4).

A frequência diminui quando a estrutura perde espessura, pois a perda de rigidez é maior que a perda de massa. Caso ambas as perdas fossem proporcionais as frequências mantinham-se semelhantes (equação (5.3)).

$$\omega_i = \sqrt{\frac{K_i}{M_i}} \quad (5.3)$$

referindo-se o índice  $i$  à ordem modal.

Quadro 5.4- Resultados da análise modal, frequências naturais e massa modal

perda esp.[mm]		0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	(%)
Massa total [Kg]		7412.54	7349.32	7287.10	7223.15	7159.96	7096.71	7033.38	6727.42	9.2
Modos Frequência (Hz)	f1	1.59	1.59	1.59	1.6	1.6	1.61	1.61	1.57	1.26
	f2	1.59	1.59	1.6	1.6	1.6	1.61	1.61	1.57	1.26
	f3	4.57	4.53	4.52	4.51	4.5	4.48	4.47	4.51	1.31
	f4	5.26	5.26	5.26	5.25	5.25	5.25	5.25	5.34	-1.52
	f5	5.26	5.26	5.26	5.26	5.26	5.25	5.25	5.34	-1.52
	f6	9.01	8.97	8.94	8.91	8.89	8.86	8.83	8.99	0.22
	f7	10.87	10.85	10.83	10.82	10.8	10.79	10.77	10.79	0.74
	f8	10.89	10.87	10.86	10.84	10.83	10.81	10.79	10.82	0.64
	f9	14.14	14.09	14.04	14	13.96	13.91	13.86	13.82	2.26
	f10	17.39	17.33	17.3	17.26	17.23	17.19	17.15	17.14	1.44

## 5.8. ANÁLISE TEMPORAL

Para procedermos ao cálculo da parcela turbulenta do vento, primeiro temos de saber em quantos parcelas (N) se quer dividir o gráfico da Figura 4.6. De acordo com o utilizado na bibliografia, [21] e [22] escolheu-se dividir em 1000.

O  $n_{máx}$  é igual a 4 e o  $n_{min}$  0.01, resultando de uma divisão do espectro (Figura 4.6) em parcelas de  $0.004(\Delta n)$ .

A questão que agora se coloca é para que altura gerar estas séries. De acordo com o EC1, para estruturas com a forma da do caso de estudo considerado, os parâmetros da função densidade espectral para o cálculo do fator estrutural devem ser calculados para uma altura de referência de aproximadamente 0,6 vezes a altura do edifício. Esta altura de referência também já foi utilizada na tese [22], sobre torres eólicas treliçadas. Tendo em conta esta indicação, a altura escolhida para gerar as séries foi de 30m, cerca de 60% da altura da torre (50m).

Foram geradas cerca de 10 séries de vento aleatórias. Dessas 10 series foi elegida para aplicar na altura de referência aquela a que correspondia à máxima grandeza da velocidade turbulenta.

No cálculo da força total, considerando os dois efeitos (estático + dinâmico) foi utilizada a equação (4.8).

Para que a última operação seja possível, a parcela dinâmica foi distribuída igualmente por todos os painéis, conforme a área respetiva de cada um, e adicionada á parcela estática anteriormente calculada.

Um fator que mostra a variação do vento turbulento em altura, é a coerência espacial. Tal efeito é tido em conta nas gerações de cargas de vento turbulentas no website [24].

Na Figura 5.7, nota-se então o referido efeito. Para uma altura de 0.05 metros, parece existir várias velocidades sobrepostas, já para uma altura de 50 metros esse efeito vai-se perdendo e as velocidades começam a ser menos intensas, com menos valores sobrepostos.

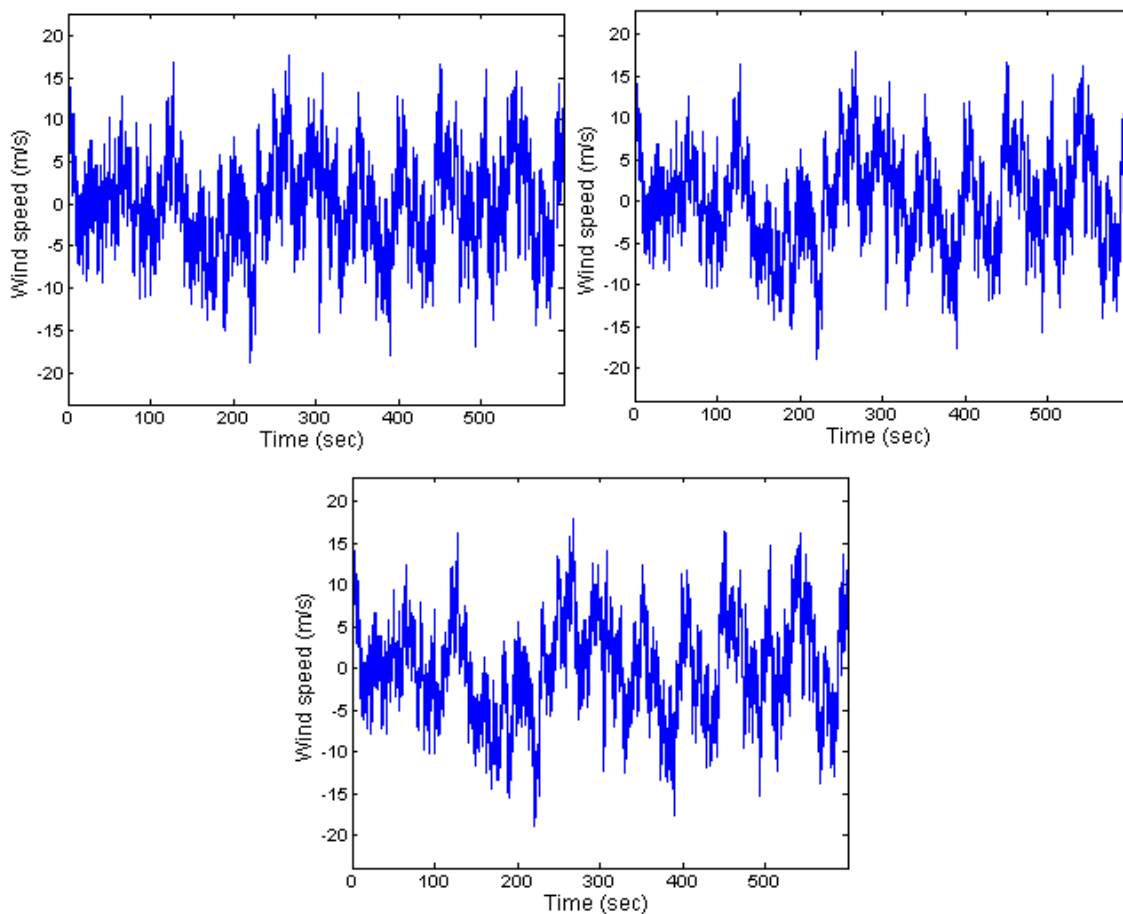


Figura 5.7-velocidade do vento turbulento  $u(t)$  para altura de 0 m, 30 e 50 m, e uma velocidade base de 28m/s e  $z_0=0.01$ , duração 600 segundos - [24]

No software “*Robot Structural Analysis Professional 2018*”, pode ser escolhido o tipo de análise que se pretende efetuar. Para a análise do vento turbulento é efetuada uma análise temporal, que integra o método de Newmark e um amortecimento de 0.05.

Muito importante para a fase seguinte dos resultados é o facto de a série que está a ser introduzida no software, ter de ser a mesma para as várias espessuras analisadas, senão não é possível realizar uma análise coerente dos resultados. Para isso usei os valores das forças de vento calculados no Quadro 5.3, introduzindo a correspondente parte dinâmica apresentada no gráfico da Figura 5.7 para 30 m.

Não é possível realizar uma combinação de ações com a ação dinâmica do vento, pois ela é uma carga que varia ao longo do tempo e o “*Robot Structural Analysis Professional 2018*” apenas permite fazer combinações de cargas estáticas. A única maneira encontrada para demonstrar o agravamento introduzido por este efeito, foi comparar a carga do vento estática sem o efeito dinâmico com o máximo da carga estática mais o efeito dinâmico.



Observando os resultados da Figura 5.8, podemos concluir que os deslocamentos com o vento em regime turbulento aumentam uma parte significativa, em relação apenas à parcela estática aplicada, cerca de 10% de diferença.

No Anexo C, são detalhados todos os valores de deslocamento para várias perdas de espessura e não apenas as apresentadas nos gráficos.

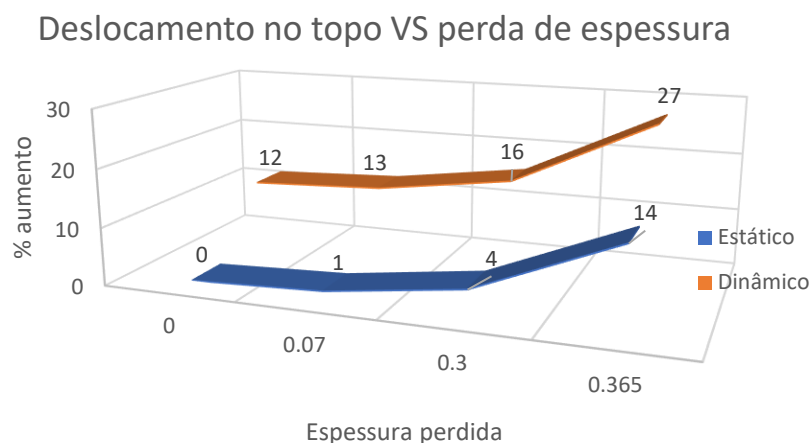


Figura 5.8-Deslocamento no topo devido à carga do vento estática e dinâmica mais estática em função da espessura perdida

## 5.9. ANÁLISE DE ENCURVADURA

Sabendo que a corrosão provoca perda de espessura, nesta secção vai-se tentar compreender a partir de que perda de espessura a estrutura começa a ter problema (de instabilidade e em que tipo de ambiente esta situação se insere).

### 5.9.1. Efeito de continuidade após as barras não verificarem

Realizando a verificação de encurvadura, retirando apenas cada vez mais espessura ao longo do tempo, não é um cenário completo. Pelo facto de não estar a ser considerado o efeito das barras deixarem de funcionar ao longo do tempo. Isto quer dizer que, partia-se de uma situação inicial em que todas as barras estavam a funcionar, isto é verificavam as situações de segurança exigidas.

Inicialmente pensou-se em retirar as barras que não verificaram à encurvadura; na análise seguinte, o problema que surgiu é consequência da matriz de rigidez ser uma matriz singular.

Uma das razões para a estrutura colapsar, pode ser o facto de a estrutura ter perdido a forma racional de assegurar a estabilidade geométrica do esqueleto estrutural (subcapítulo 4.2), porque a tipologia (após não funcionalidade de barras que deixaram de verificar a segurança) deixou de satisfazer as referidas condições de estabilidade. Outra razão pode ser o facto de a barra em questão, ser importante para equilíbrio de rotações e fazer parte da estrutura principal.

A única forma considerada viável, dentro do possível, foi tornar as barras que não verificaram a segurança à encurvadura em barras articuladas, após não verificarem à encurvadura em condições de barras reticuladas. O facto de serem tornadas articuladas, estamos a enfraquecer o modelo, que é o pretendido para ser simulado este efeito de continuidade.

Apesar disso, não se transformou tais barras completamente em barras articuladas, mas na realidade apenas foram consideradas como barras a tender para comportamento articulado semelhante. Tal conseguiu-se aumentando os coeficientes de encurvadura dessas barras para valores correspondentes quase articuladas ( $k=0.95$ ).

Outro problema que surgiu à posteriori, na análise à encurvadura, foi o facto de as primeiras barras a não funcionar serem montantes. Os montantes, deveriam ser os últimos elementos a não funcionar para um modelo corretamente construído. Primeiramente deveriam falhar as diagonais, que são os elementos mais fracos e posteriormente as travessas e só em último caso os montantes. Este facto, apenas prova que o modelo fornecido, não contém um dimensionamento otimizado. Mas utilizaram-se as características seccionais e dimensionais facultadas pela empresa Metalgalva.

#### 5.9.2. Tipos de modelos

##### 5.9.2.1. Modelo com montantes articulados e diagonais e travessas reticulados

O modelo facultado, tinha exatamente este comportamento e tal tem uma razão. A razão é para que o cálculo do número de parafusos nas chapas de Gousset, seja possível. Se não existirem momentos nas barras, não é possível proceder a este cálculo. Sendo assim, consideraram as diagonais com uma capacidade reduzida de flexão, por esse motivo.

##### 5.9.2.2 Modelo todas as barras articuladas

Uma simulação onde as barras tenham todas um comportamento articulado tipo ‘truss’, apenas resistentes ao esforço axial é o cenário mais desfavorável de ser representado.

A Torre em questão, caso as barras sejam todas articuladas é uma estrutura isostática. Por essa razão, deveríamos ter por segurança uma estrutura hiperestática.

O pior não é o facto anterior, mas sim o facto de este tipo de estrutura gerar uma instabilidade nos apoios: instabilidade de rotação em z. A respetiva instabilidade ocorre porque as diagonais têm todas a mesma orientação nos painéis de cada piso. A única forma de resolver esta instabilidade seria de facto trocar a direção das barras diagonais ordenadamente; ou melhor seria usando diagonais cruzadas (“cross braces”).

##### 5.9.2.3. Modelo com montantes reticulados e diagonais e travessas articulados

Inicialmente pensei que seria o melhor modelo a desenvolver, mas depois alguns problemas foram surgindo. Problemas estes que já tinham surgido no modelo anterior, com as barras apenas articuladas. O modelo fornecido, possuía uma escada que transmitia carga á torre; esta carga estava aplicada numa barra entre as travessas. Não é possível então mudar as travessas nem a barra onde está aplicada a carga da escada para articuladas, senão a carga não é transferida para os montantes, daí as instabilidades surgidas.

No entanto simplificações adotadas podem fazer este modelo funcionar, tais como, repartir a carga aplicada na travessa diretamente para os montantes como na Figura 5.9.

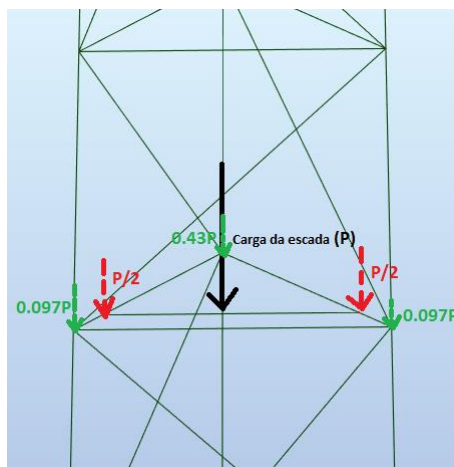


Figura 5.9-Distribuição das cargas da escada

#### 5.9.2.4. Modelo com todas as barras reticuladas

O modelo com todas as barras reticuladas é um modelo possível de se desenvolver em que não ocorrem instabilidades. O modelo é um bom modelo representativo da realidade, só não é tão representativo como o modelo de montantes e travessas reticuladas e diagonais articuladas.

#### 5.9.2.5. Modelo com travessas e montantes reticulados e diagonais articulados

Este modelo é o modelo mais próximo da realidade, pois montantes e travessas estão contribuindo com capacidade à flexão, tornando-se um comportamento tipo “diafragma” com as diagonais articuladas funcionando parcialmente como contraventamento. Conforme referido anteriormente, contraventamento de diagonais cruzadas seria o ideal.

Ao verificar o estado limite de encurvadura, pela expressão (4.16), apura-se que as barras que não verificaram na análise linear estática, foram praticamente as mesmas que não verificaram para uma análise não linear estática das cargas aplicadas, considerando efeitos P- $\delta$ . Isto quer dizer que os deslocamentos laterais não são elevadas e não aumentaram significativamente as forças.

O resultado foi o previsto, à medida que a perda de espessura aumenta, mais barras não verificam à encurvadura.

Todas as barras que não verificaram à segurança são do tipo montante (Quadro 5.5), isto quer dizer que a capacidade vertical da estrutura pode ficar comprometida.

Um motivo para que a distribuição de forças tenha feito com que os montantes fossem os primeiros a falhar, pode ser o facto de o contraventamento por patamar ser realizado apenas por uma diagonal e não duas. Se a estrutura tivesse duas diagonais por painel de cada andar, as forças não se distribuíam tão facilmente para os montantes e um comportamento tipo diafragma era melhor representado.

Quadro 5.5– Resultado da verificação da análise de encurvadura

		Tipo de Análise			
		Linear	Linear	Linear	Não linear
% loss [mm]	Tipo	“0.7L,0.8L,1L”	“Encastramento perfeito”	“0.8L,0.9L,1L”	“0.8L,0.9L,1L”
0	-	0	0	0	0
0.05	-	0	0	0	0
0.1	Montante	0	0	166	0
0.15	Montante	0	0	166,209	166, 209
0.2	Montantes	166	0	70, 166 209	166,209
0.25	Montantes	166	0	70, 166,209	70,166,209
0.3	Montantes	70,166,209	0	70, 166,209	70,166,209
0.35	Montantes	70,166,197, 198,199,200, 201,203,204, 205,209	197,198,199, 200,201,203, 204,205	2,70,166,188,	2,70,166,188,
				197,198,199, 200,201,203, 204,205,209	197,198 199, 200,201,203, 204,205,206, 209

Normalmente quando uma barra deixa de funcionar, as próximas também têm tendência a não funcionar. Este comportamento é o que se reflete no Quadro 5.5, as barras que não verificam á encurvadura encontram-se próximas uma das outras. Se continuasse a aumentar a perda de espessura as outras barras próximas dos novos polos que não verificaram, iriam não verificar também.

#### 5.9.2.5.1. Efeito da não linearidade das forças

Apesar da análise não linear não aumentar em grande proporção os esforços, eles aumentam um pouco (Quadro 5.6).

Quadro 5.6- Tipos de barras que não verificaram a segurança e variação dos esforços na análise linear e não linear para a situação inicial (0% perda de espessura)

BAR	COMB	N (kN) linear	N (kN) não linear	Aumento (-)
0.35 mm espessura perdidos, caso real				
2	+	790.92	796.78	5.86
70	+	479.4	482.02	2.62
166	+	1113.31	1122.25	8.94
188	+	1437.9	1449.39	11.49
197	30	1759.96	1773.48	13.52
198	30	1655.13	1668.37	13.24
199	+	1545.54	1555.87	10.33
200	30	-1444.46	-1458.51	14.05
201	30	-1386.59	-1400.47	13.88
203	30	1518.34	1530.35	12.01
204	30	1400.57	1411.64	11.07
205	30	1338.1	1348.87	10.77
206	+	2080.54	2095.46	14.92
209	+	2393.59	2408.89	15.3

É de notar que mesmo o esforço axial e o momento de cálculo, não é o mesmo para as diferentes espessuras das secções (Quadro 5.7). A razão, é que o esforço axial depende das características da secção e para além disso, também não varia linearmente com estas, pois as propriedades geométricas também não variam linearmente conforme a perda de espessura (área, inércia, etc..).

Quadro 5.7-Variação o esforço axial de cálculo consoante a perda de espessura nos vários tipos de elementos da torre

Montante 166		Diagonais 77		Travessas 102	
Perda[mm]	Ned Linear	Perda[mm]	Ned linear	Perda[mm]	Ned linear
0	1113.87	0	86.07	0	6.17
0.05	1113.79	0.05	86.07	0.05	6.16
0.07	1113.79	0.07	86.063	0.07	6.149
0.1	1113.79	0.1	86.06	0.1	6.14
0.15	1113.63	0.15	86.05	0.15	6.11
0.2	1113.55	0.2	86.04	0.2	6.09
0.25	1113.47	0.25	86.03	0.25	6.07
0.3	1113.47	0.3	86.03	0.3	6.04
0.35	1113.31	0.35	86.02	0.35	6.02
0.365	1113.262	0.365	86.017	0.365	6.014

O deslocamento no topo da estrutura também é um parâmetro importante a ser avaliado. Tal como acontece na Figura 5.10, à medida que retiramos espessura na estrutura, maior é o deslocamento observado, sendo novamente na análise não linear as consequências ligeiramente maiores. Para além disso acontece outro aspeto interessante na Figura 5.10, quando a perda de espessura ultrapassa os 0.3 mm, a evolução do deslocamento aumenta em maior proporção do que o acontecido até este ponto. Este resultado acontece, pois mais barras não verificam à encurvadura após 0.3 mm de espessura perdida.

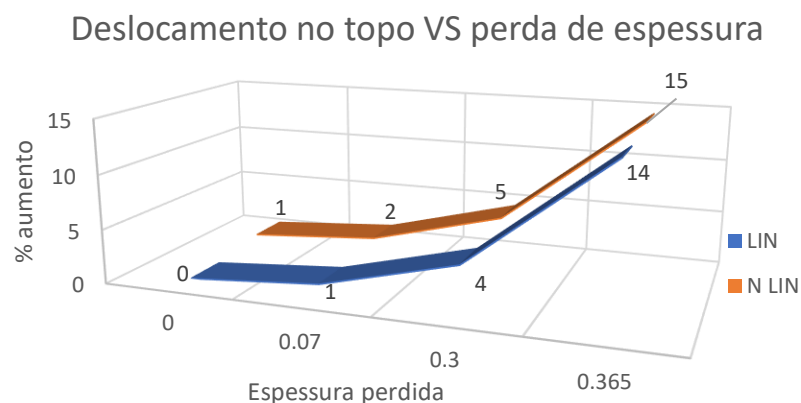


Figura 5.10-Deslocamento no topo da estrutura em função da espessura perdida na estrutura

### 5.9.3. Perda da capacidade resistente em função da espessura perdida

Na construção dos gráficos deste capítulo, foi adotada uma escala, com crescimento não linear no eixo da espessura perdida. Isto quer dizer que um intervalo de igual distância visual, tem diferentes tamanhos. Esta representação foi escolhida, pois é a normalmente utilizada neste tipo de questão e assim fica distinguível os 3 tipos de corrosão baixa, média, alta [5].

Este aviso está a ser feito, pois pode induzir em erro á primeira vista. As inclinações neste gráfico são devido ao exposto anteriormente.

Se para esta análise tivéssemos optado por intervalos de espessura perdida com um crescimento linear, obteríamos uma reta quase linear nos próximos gráficos.

No capítulo 3.10, chegámos à conclusão que era considerada corrosão baixa até uma perda de 0.07 mm de espessura; corrosão média de 0.07 a 0.3 mm; e corrosão alta de 0.3 mm até 0.365 mm. Com estes intervalos de valores se baseou a construção à escala dos gráficos seguintes. Assim é possível ver a rapidez com que evolui a corrosão para estes 3 tipos: baixa, média, alta.

Apesar disso no Anexo E, são apresentados os valores concretos dos gráficos seguintes para várias espessuras e não só os limiares de corrosão baixa, média, alta.

Para conseguir realizar a análise do gráfico seguinte, foram utilizados os dados de uma barra do tipo montante, travessa e montante. Visto que o comportamento de cada tipo de barras é semelhante, basta uma barra de cada tipo para proceder a uma observação.

A combinação de cargas usada nos próximos gráficos foi a combinação que deu mais condicionante na verificação de encurvadura.

Apenas será realizada uma análise da variação dos esforços axiais, pois o momento é uma parcela pequena na maior parte das barras.

A capacidade resistente ao esforço axial é igual à área multiplicada pela tensão de cedência do aço. O aço usado é um aço tipo S355, de tensão de cedência igual a 355 Mpa.

Visto que estamos a mostrar a sua variação ao longo do tempo, com a diminuição da área, a capacidade resistente também diminui (Figura 5.11).

O decrescimento parece linear na Figura 5.1, mas não completamente, pois a área da secção não decresce uniformemente com a perda de espessura.

Ainda nessa figura, consegue-se concluir que o esforço axial resistente nas barras do tipo travessa e diagonal, decresce muito mais rápido do que as barras do tipo montante. Apesar disso, sabemos que foram mais montantes que não verificaram. No próximo tópico ir-se-á perceber o porquê dessa ocorrência.

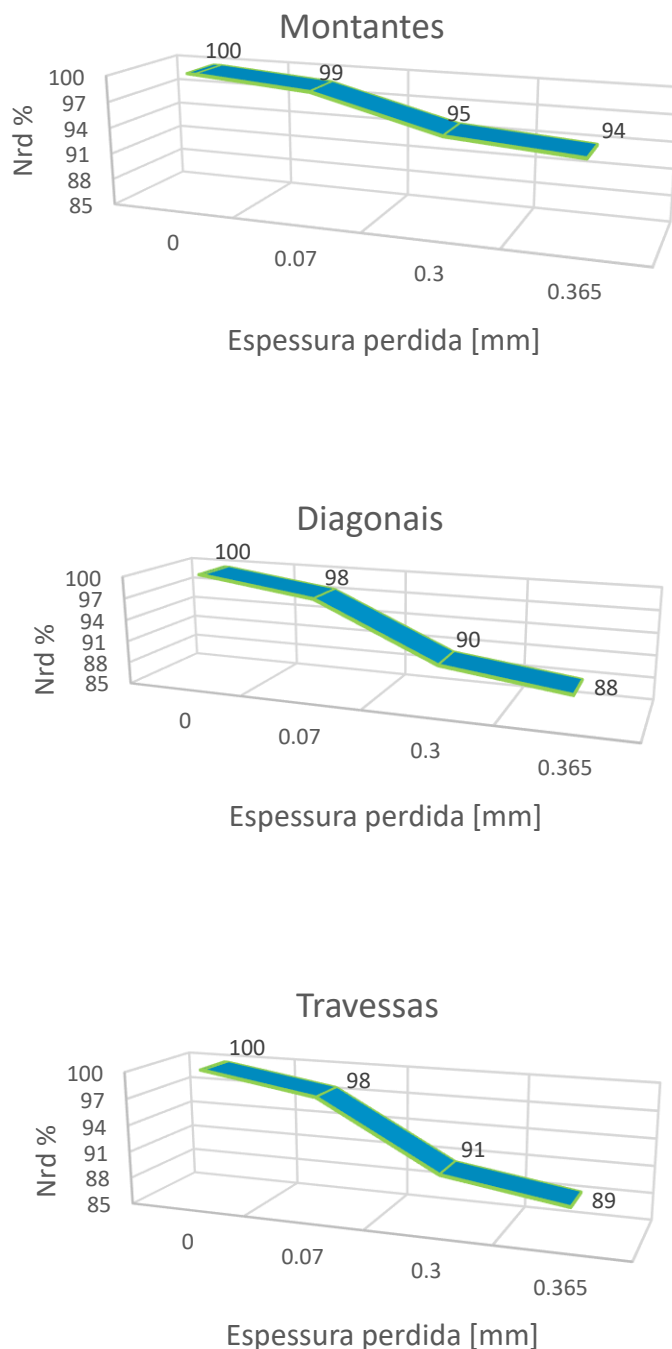


Figura 5.11-Relação entre a perda de Nrd e a perda de espessura[mm] para os vários tipos de barras

Como indicado anteriormente, mais montantes irão ficar comprometidos à medida que se perde espessura. Isto deve-se ao facto de a diferença entre a capacidade resistente e de cálculo ser menor nos montantes com o passar do tempo (Figura 5.12).

Nos gráficos seguintes, também se comprova o aumento dos esforços de cálculo, na análise não linear.



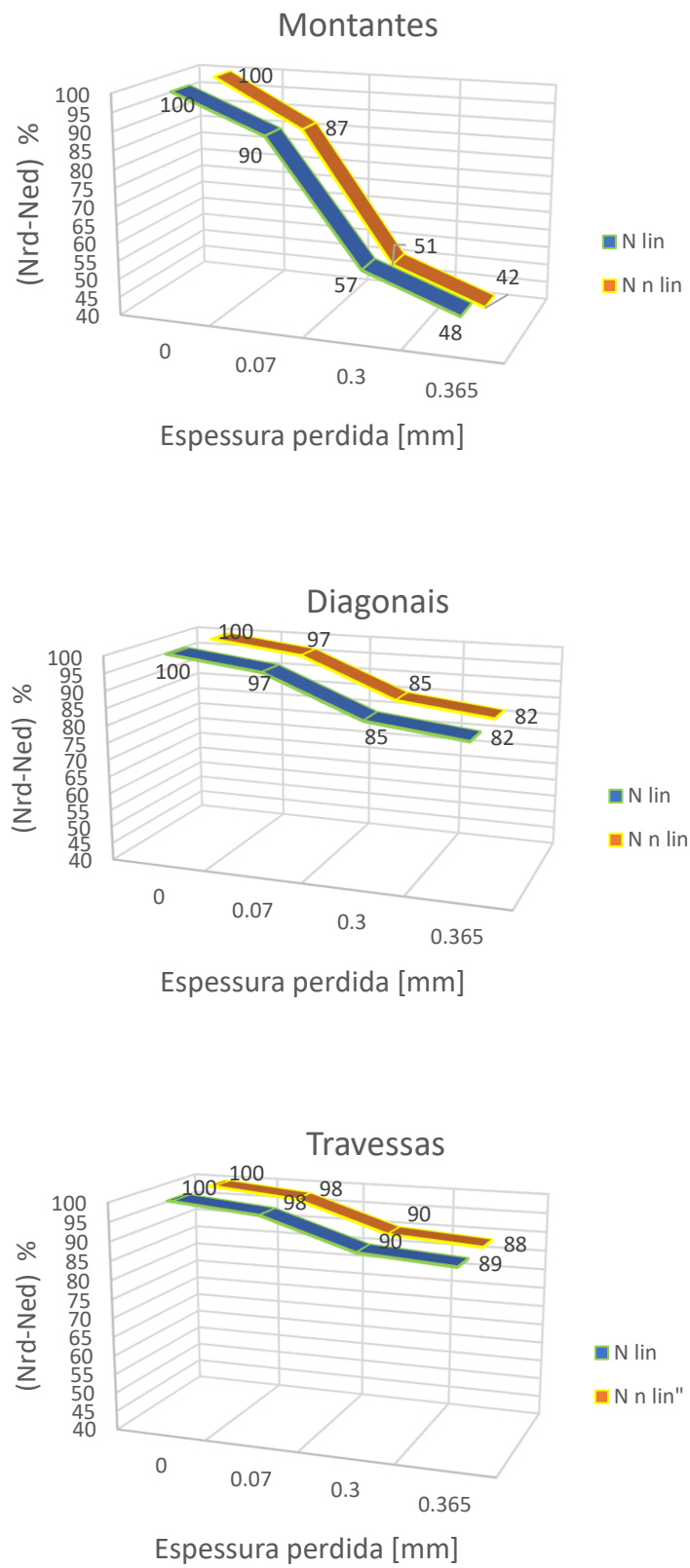
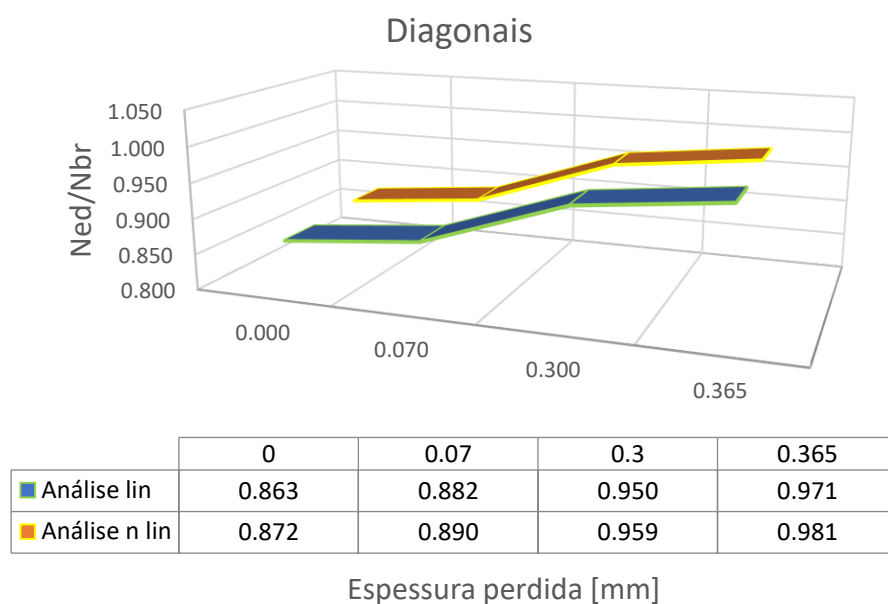
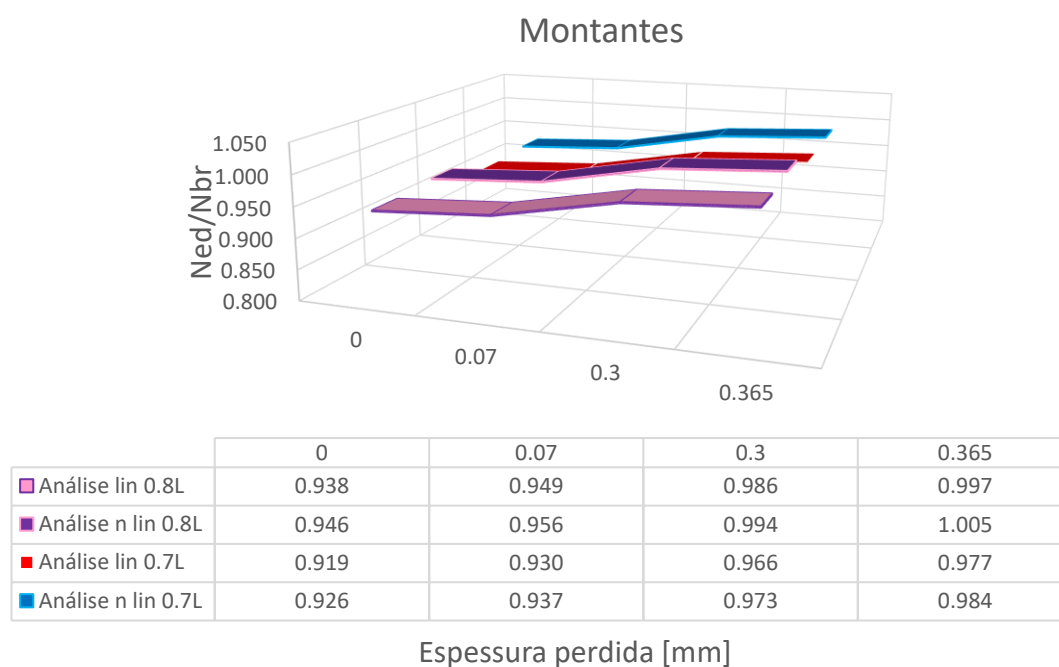


Figura 5.12-Relação entre a diferença de  $N_{rd}$  e  $N_{ed}$  e a perda de espessura em [mm]

Como esperado o rácio entre o esforço axial de cálculo e a capacidade resistente por flexão em montantes, cresce muito mais rapidamente do que nas travessas e diagonais (Figura 5.13), o que faz com que mais barras deste tipo não verifiquem nesta análise.

No subcapítulo 4.8.3, afirmou-se que, quanto maior o comprimento de encurvadura, maior é a insegurança da estrutura. Tal consequência é observada nos próximos gráficos.



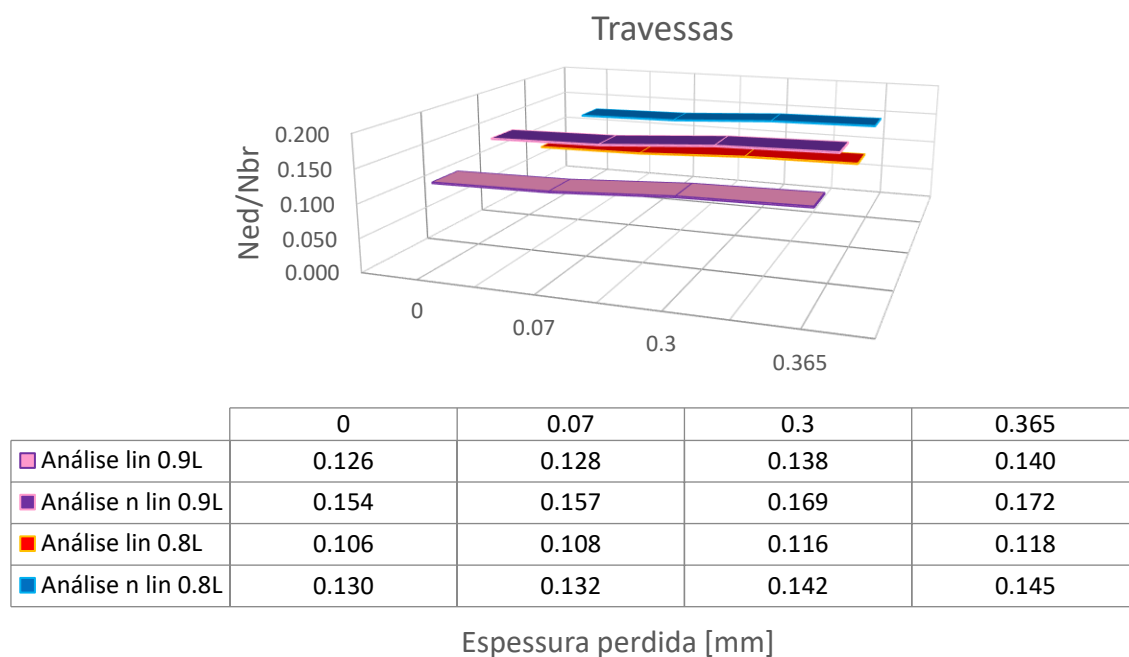


Figura 5.13- Relação entre a Divisão de Ned e Nrd e a perda de espessura em [mm]

## 5.10. ANÁLISE DE FIABILIDADE

Na Figura 5.14, estão representados os resultados dos índices de fiabilidade calculados pela fórmula (4.20), para os vários tipos de elementos na torre (Montantes, Travessas e diagonais).

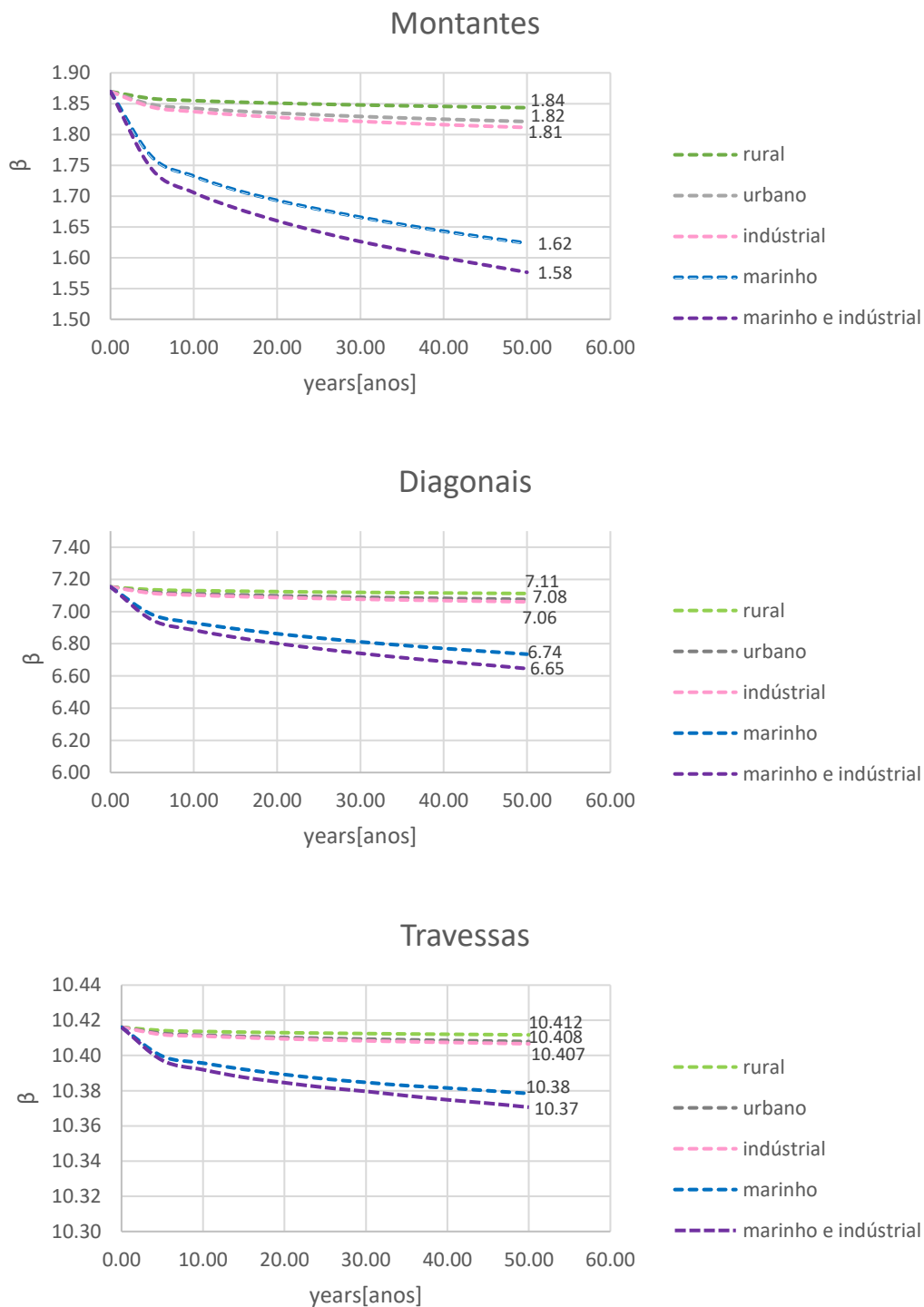


Figura 5.14-Índice de fiabilidade para montantes, diagonais e travessas

Como já tinha referido no capítulo 4, o índice de fiabilidade é uma medida de segurança. Sendo assim podemos tirar algumas conclusões dos gráficos da Figura 5.14.

Os resultados estão conforme os gráficos do subcapítulo 5.7, tinha-se concluído que, os primeiros elementos a falhar seriam montantes, seguidamente diagonais e por fim travessas. Assim o índice de fiabilidade é maior nas travessas, seguidamente das diagonais e por fim nos montantes, como acontece na Figura 5.14, pois quanto maior é a segurança, maior é este índice.

Portanto estes resultados do índice de fiabilidade, apresentam uma variabilidade consistente com do modelo desempenho representado.



# 6

## CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1. CONCLUSÕES

De um modo geral a corrosão é considerada severa, quando o revestimento começa a descamar, e em alguns casos já apresenta corrosão em forma de “*pitting*”.

Para o exemplo da torre de referência utilizada neste trabalho, a espessura global perdida a partir da qual a corrosão deverá ser considerada alta é da ordem dos 0.3 mm aproximadamente. O limite considerado nas análises para a perda de espessura foi de 0.365 mm, devido à temperatura escolhida de 20°C; mas, de um modo geral, em alguns estudos essa perda de espessura pode chegar aos 0.4 mm em 50 anos.

Um aspeto bastante importante na modelação da torre de referência considerada, é o fato de não poder haver erros, para não haver resultados mal interpretados. Assim as secções reais (nos sucessivos estádios de corrosão) têm de ser bem calculadas e introduzidas, e o comportamento das barras simulado tem de ser o real. Os montantes e as travessas deverão ser modeladas como barras reticuladas e as diagonais como barras articuladas, para que a distribuição de forças generalizadas internas seja mais correta.

O comportamento não linear da estrutura face às cargas verticais não aumentou muito o esforço axial, apenas cerca de 1%. Já a parcela dinâmica introduzida na carga do vento, pode aumentar significativamente os resultados, cerca de 10% relativamente ao vento apenas pseudo-estático.

A diminuição de espessura das barras reduz até cerca de 12% o esforço axial resistente ao final de 50 anos.

Os montantes infelizmente foram as primeiras barras a deixar de funcionar, pois a diferença entre o esforço axial atuante e o resistente diminui rapidamente com a perda de espessura. Todavia tal facto deve-se à tipologia estrutural utilizada na torre de referência facultada.

### 6.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta tese, a torre metálica foi dimensionada tendo em conta a ação do vento como dominante, que é o processo normalmente realizado. Poderia também verificar-se qual o efeito adicional da perda de espessura (devida à corrosão) na verificação de torres à ação sísmica, para torres metálicas dimensionadas para a ação do vento.

Outro aspeto bastante importante relaciona-se com o facto de os resultados experimentais ou observacionais e computacionais não serem da mesma torre. Perante esta situação, era importante a observação continua de uma torre, durante um período de cinco anos, para prever e comparar com mais pormenor os efeitos de corrosão.

A simulação adotada para uma barra que não verifica à encurvadura foi considerá-la uma barra articulada ou quase articulada (com um coeficiente de encurvadura entre 0.9 e 1). Poder-se-ia ter optado por uma análise mais detalhada realizada ao nível das tensões nas secções. Para tal esta mesma torre de referência poderia simultaneamente ser analisada (e verificada passo-a-passo) através de uma análise elasto-plástica (não linearidade material) analisando (por exemplo) quais as fibras que plastificariam primeiro, retirando (por exemplo) a espessura dessas fibras, isto é a sua contribuição. E também preferencialmente com a inclusão de efeitos não lineares geométricos, ou seja realizando uma análise elasto-plástica de 2ª ordem, que de um modo geral faculta a trajetória mais real do comportamento estrutural no plano de carga.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Paiva, Fábio Moutinho (2017) – *Condition Assessment of existing transmission line system*.
- [2] Suman, Mr. Brajesh Kumar (2017) - *Structural Analysis & Design Of Steel Transmission Tower*.
- [3] M.E, Mr.Sanjeevi .R – *Design And Analysis Of Transmission Tower (220 Kv)*.
- [4] Hydro-Québec - *Servitudes and property rights – Transmission lines and substations*.
- [5] Badran, Mohammed S. Al (2013) - *Structural Reliability Analysis Of Corroded Steel Girder Bridge*. University of Nebraska - Lincoln.
- [6] Me Zenglu, Cheng Zhiyun (2004) - *Corrosion and prevention of zinc deposit of transmission towers .pdf*. SG Electric Power Construction Research Institute.
- [7] Liu Yuwei, Wang Zhenyao Wang Jun H. U. Botao (2014) - *Corrosion Behavior of Hot-dip Galvanized Steel for Power Transmission Tower in Simulated Acid Rain Atmospheric Environment*. Journal of Chinese Society for Corrosion and protection. 34:5 %U {[http://www.jcscp.org/CN/abstract/article\\_22814.shtml](http://www.jcscp.org/CN/abstract/article_22814.shtml)} %8 2014-10-25. 426-432.
- [8] Pilar Navajas Ramirez, António Lopez Romero (2009) - *Protección y durabilidad de las estructuras de acero*. ISSN 9788469192375.
- [9] Fundão, Departamento de Tecnologias Especiais e Departamento de Laboratórios do - *Fundamentos de Corrosão Metálica*. Cepel, Electrobras.
- [10] Davies, David K. - *North American tower failures:causes and cures*. Consolidated Engineering Inc.
- [11] Langill, Dr. Tom (2011) - *Galvanized Steel Performance - pH Curve*. Americal Galvanizers Association.
- [12] Protection, Blygold corrosion - Blygold Casing Coating Compliant with ISO12944.
- [13] Raffaele Landolfo, Lucrezia Cascini and Francesco Portioli (2010) - *Modeling of Metal Structure Corrosion Damage: A State of the Art Report* Department of Constructions and Mathematical Methods in Architecture, University of Naples Federico II, Via Forno Vecchio 36, 80134 Naples, Italy. ISSN 2071-1050.
- [14] Barragan, Matthew Bruce (2016) - *Assessment, Prevention And Remediation Of Corrosion In Weathering Steel Transmission Line Poles*. University of South Carolina.
- [15] Fundão, Departamento de Tecnologias Especiais e Departamento de Laboratórios do - Laboratório de Corrosão do Cepel – parte 2. Eletro Obras Cepel.
- [16] Cepel, Electrobras - *Defeitos de pintura durante a aplicação e em condições de serviço*.
- [17] Fundão, Departamento de Tecnologias Especiais e Departamento de Laboratórios do - *Graus de intemperismo de aço carbono-Inspeção de Pintura*. Cepel, Eletroobras.
- [18] Yuri C. Sicai; Elaine D. Kenney; Kleber F. Portellai, \*; Djalma F. Campos FilhoII (2007) - *Atmospheric corrosion performance of carbon steel, galvanized steel, aluminum and copper in the North Brazilian coast*. Journal of the Brazilian Chemical Society . J. Braz. Chem. Soc. vol.18 no.1 São Paulo 2007: ISSN 1678-4790.

- [19] Mini K, Manjunatha B.M - Estimation of Suspended Particulate Matter (SPM), *Respirable Particulate Matter (RPM) and <sup>232</sup>Thorium Concentration Variations in Ambient Air due to Beach Placer Mining in Manavalakurichi*, South West Coast of Tamilnadu, India. Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. ISSN 2319-8753.
- [20] Dawn E. Klinesmith, Richard H. McCuen and Pedro Albrecht (FEBRUARY 2007) - *Effect of Environmental Conditions on Corrosion Rates*. Asce /Journal Of Materials In Civil Engineering.
- [21] Mendonça, Cecília Maria Andrade (2012) - *Dimensionamento de Torres Espiadas de Grande Altura*.
- [22] Henriques, Jorge Fernando Martins (2012) - *Projecto de torres eólicas reticuladas de grande altura (150m) -Modelação E Análise Comparativa Com Estruturas Tubulares Auto-Suportadas*.
- [23] Jorge M. Henriques , Rui C. Barros (Kos Island, Greece, 12-14 June 2013) - *Comparison of a Tall Lattice Wind Tower Response With and Without a TMD*. COMPDYN 2013 : 4 th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Proceedings editado por: M. Papadrakakis, V. Papadopoulos, V. Plevris. CD-ROM Paper 1663 - 16 pages.
- [24] [http://evovw.ce.nd.edu/wsLui/wsLui1\\_init1\\_noauth1.html](http://evovw.ce.nd.edu/wsLui/wsLui1_init1_noauth1.html) - visitado em 24/6/2018
- [25] Barros, Rui Carneiro (Editor) (Junho 2015) - VHSS Poles : *Desenvolvimento de um Banco de Ensaios para Validação de Apoio Tubulares em Aço de Alta Resistência para Linhas de Transmissão*. FEUP-Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto.
- [26] R. Barros, A. Preumont - *School and Symposium on Smart Structural Systems Technologies (S3T 2010)*. Book of 530 pages (sponsored by ESF) ,FEUP, <http://paginas.fe.up.pt/~s3t/welcome.html> )
- [27] Ottavia Corbi, Rui Carneiro Barros, (October 2013) - *Seismic Protection of Civil Buildings by Visco-Elastic Magneto-Rheological Fluids*. International Journal of Mechanics. Volume 7, pp:518-525:Issue 4. ISSN 1998-4448.
- [28] Barros, Rui Carneiro de (2006) - *A não linearidade geométrica na análise de estruturas elásticas*. MIEC-Teoria das estruturas 2 .
- [29] Barros, Rui Carneiro de (1983) - *Buckling Analysis of end restrained imperfect tubular beam columns*. Dissertation of University of Akron .
- [30] Barros, Rui Carneiro (Swansea, 1986) - *Elasto-Plastic Buckling Analysis of End-Restrained Spatial Tubular Beam Columns*. Numerical Methods for Non-Linear Problems, Ed.: C. Taylor,D.R.J. Owen, E. Hinton, F.B. Damjanic. Vol. 3, Secção 4:Plasticity/ Structures, pp. 419-431, Pineridge Press.
- [31] Barros, Rui Carneiro (Berlim, 1986) - *Buckling in Space of End-Restrained Tubular Beam-Columns*. Computational Methods and Experimental Measurements. Vol. II, Section 9: Steel Structures, pp. 573-582, Springer-Verlag.
- [32] Barros, Rui Carneiro (Beijing, China, 1987) - *On the Effective Length Factor of Spatial Tubular Members*. Proceedinhe International Conference onComputational Engineering Mechanics, Ed.: Yang Ling and Li Chengxiang. Secção VII: Nonlinear Analysis, pp. 509-515, Science Press.
- [33] Barros, Rui Carneiro (England 1988) - *Improved Convergence of the Influence Coefficient Method*,Computers and Structures. Pergamon Press . Vol. 30, Number 3, pp. 697-704.
- [34] Libânio M. Pinheiro, Cassiane D. Muzardo, Sandro P. Santos (6 maio 2003 ) - *Bases para cálculo* – capítulo 6.
- [35] Nanni, Hany Jawaheri Zadeh e Antonio (November 2013) - *Reliability Analysis of Concrete Beams Internally Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars*. Aci Structural Journal .

- [36] Prof.Ing.Josef Vican, Csc - *Reliability of existing bridge structures*. University of Zilina-Department of Structures and Bridges .
- [37] Fu, Xing; LI, Hong-Nan; LI, Jia-Xiang (2018) - *Wind-Resistance and Failure Analyses of a Lightning-Damaged Transmission Tower*. Journal of Performance of Constructed Facilities [Em linha]. 32:1. ISSN 0887-3828 1943-5509.
- [38] T.G. MARA , H.P. Hong (2013) - *Effect of wind direction on the response and capacity surface of a transmission tower*. ELSEVIER.
- [39] A Elvin, R Walls, D Cromberge (2009) - *Optimising structures using the principle of virtual work* Journal Of The South African Institution Of Civil Engineering . Vol 51 No 2, 2009, Pages 11–19.
- [40] Xing Fu , Hong-Nan Li (2018) - *Uncertainty analysis of the strength capacity and failure path for a transmission tower under a wind load*. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics.



## **ANEXOS**

## ANEXO A

### CÓDIGO

### GERADO NO EXCEL PARA RESULTADO

### AUTOMÁTICO DA CLASSE DE CORROSIVIDADE

### ATMOSFÉRICA

```
Private Sub resulta_Click()  
Select Case Me.CLASSE_HUMIDADE.Value  
Case Is = 1  
    If Me.ISO_CLORETO.Value = 0 Or Me.ISO_CLORETO.Value = 1 Or Me.ISO_CLORETO.Value = 2 Then  
        Select Case ISO_SULFATO.Value  
        Case Is = 0  
            Me.result_2.Text = "C1"  
            Case Is = 1  
                Me.result_2.Text = "C1"  
                Case Is = 2  
                    Me.result_2.Text = "C1"  
                    Case Is = 3  
                        Me.result_2.Text = "C2"  
        End Select  
    End If  
End Select  
  
Select Case Me.CLASSE_HUMIDADE.Value  
Case Is = 1  
    If Me.ISO_CLORETO.Value = 3 Then  
        Me.result_2.Text = "C2"  
    End If  
End Select
```

Diagram illustrating the logic flow for determining the atmospheric corrosivity class (Classe de corrosividade) based on the humidity class (CLASSE\_HUMIDADE) and ISO values (ISO\_CLORETO, ISO\_SULFATO).

The logic flow is as follows:

- Start with **Classe TOW** (blue arrow).
- Check **Classe CD** (yellow arrow) based on **ISO\_CLORETO** values (0, 1, or 2). If true, proceed to the next step.
- Check **Classe SD** (purple arrow) based on **ISO\_SULFATO** values (0, 1, 2, or 3). If true, proceed to the next step.
- Assign the corrosivity class based on the ISO\_SULFATO value:
  - ISO\_SULFATO = 0: **Classe de corrosividade C1** (red arrow).
  - ISO\_SULFATO = 1: **Classe de corrosividade C1** (red arrow).
  - ISO\_SULFATO = 2: **Classe de corrosividade C1** (red arrow).
  - ISO\_SULFATO = 3: **Classe de corrosividade C2** (red arrow).

```
Select Case Me.CLASSE_HUMIDADE.Value
Case Is = 2

    If Me.ISO_CLORETO.Value = 0 Or Me.ISO_CLORETO.Value = 1 Then

        Select Case ISO_SULFATO.Value
            Case Is = 0

                Me.result_2.Text = "C1"
                Case Is = 1

                Me.result_2.Text = "C1"
                Case Is = 2

                Me.result_2.Text = "C2"
                Case Is = 3
                Me.result_2.Text = "C2"
            End Select
        End If
    End Select

    Select Case Me.CLASSE_HUMIDADE.Value
Case Is = 2

    If Me.ISO_CLORETO.Value = 2 Then

        Select Case ISO_SULFATO.Value
            Case Is = 0

                Me.result_2.Text = "C2"
                Case Is = 1

                Me.result_2.Text = "C2"
                Case Is = 2

                Me.result_2.Text = "C3"
                Case Is = 3
                Me.result_2.Text = "C3"
            End Select
        End If
    End Select
```

```
        Select Case Me.CLASSE_HUMIDADE.Value
Case Is = 2

    If Me.ISO_CLORETO.Value = 3 Then

        Me.result_2.Text = "C4"

    End If
End Select


    Select Case Me.CLASSE_HUMIDADE.Value
Case Is = 3

If Me.ISO_CLORETO.Value = 0 Or Me.ISO_CLORETO.Value = 1 Then

    Select Case ISO_SULFATO.Value
        Case Is = 0

            Me.result_2.Text = "C3"
            Case Is = 1

            Me.result_2.Text = "C3"
            Case Is = 2

            Me.result_2.Text = "C4"
            Case Is = 3
            Me.result_2.Text = "C4"
        End Select
    End If
End Select


    Select Case Me.CLASSE_HUMIDADE.Value
Case Is = 3

If Me.ISO_CLORETO.Value = 2 Then

    Select Case ISO_SULFATO.Value
        Case Is = 0

            Me.result_2.Text = "C4"
            Case Is = 1

            Me.result_2.Text = "C4"
            Case Is = 2

            Me.result_2.Text = "C4"
            Case Is = 3
            Me.result_2.Text = "C5"
        End Select
    End If
End Select
```



```
Select Case Me.CLASSE_HUMIDADE.Value
Case Is = 3

If Me.ISO_CLORETO.Value = 3 Then

    Select Case ISO_SULFATO.Value
    Case Is = 0

        Me.result_2.Text = "C4"
        Case Is = 1

        Me.result_2.Text = "C4"
        Case Is = 2

        Me.result_2.Text = "C5"
        Case Is = 3
        Me.result_2.Text = "C5"
    End Select
End If
End Select

Select Case Me.CLASSE_HUMIDADE.Value
Case Is = 4

If Me.ISO_CLORETO.Value = 0 Or Me.ISO_CLORETO.Value = 1 Then

    Select Case ISO_SULFATO.Value
    Case Is = 0

        Me.result_2.Text = "C3"
        Case Is = 1

        Me.result_2.Text = "C3"
        Case Is = 2

        Me.result_2.Text = "C4"
        Case Is = 3
        Me.result_2.Text = "C5"
    End Select
End If
End Select
```

```
Select Case Me.CLASSE_HUMIDADE.Value
Case Is = 4

If Me.ISO_CLORETO.Value = 2 Then

    Select Case ISO_SULFATO.Value
    Case Is = 0

        Me.result_2.Text = "C4"
        Case Is = 1

        Me.result_2.Text = "C4"
        Case Is = 2

        Me.result_2.Text = "C4"
        Case Is = 3
        Me.result_2.Text = "C5"
    End Select
End If
End Select

Select Case Me.CLASSE_HUMIDADE.Value
Case Is = 4

If Me.ISO_CLORETO.Value = 3 Then

    Me.result_2.Text = "C5"

End If
End Select
```

```
Select Case Me.CLASSE_HUMIDADE.Value
Case Is = 5
If Me.ISO_CLORETO.Value = 0 Or Me.ISO_CLORETO.Value = 1 Then

    Select Case ISO_SULFATO.Value
        Case Is = 0

            Me.result_2.Text = "C4"
            Case Is = 1

            Me.result_2.Text = "C4"
            Case Is = 2

            Me.result_2.Text = "C5"
            Case Is = 3
            Me.result_2.Text = "C5"
        End Select
    End If
End Select

Select Case Me.CLASSE_HUMIDADE.Value
Case Is = 5

    If Me.ISO_CLORETO.Value = 3 Or Me.ISO_CLORETO.Value = 2 Then

        Me.result_2.Text = "C5"

    End If
End Select

End Sub
```

## **ANEXO B**

### **FUNÇÃO SIMPLIFICADA PARA O CÁLCULO DA VELOCIDADE TURBULENTA, SEM O EFEITO DA COERÊNCIA ESPACIAL**

```
Function u(deltan As Double, nmin As Double, lz As Double, vm As Double, sigmav As Double, t As Double) As Double
Dim angulo_fase As Double
Dim k As Integer

ut = 0

For k = 1 To 1000

nk = nmin + k * deltan
fk = nk * lz / vm
S1 = 6.8 * fk / ((1 + 10.2 * fk) ^ (5 / 3))
Sv = S1 * sigmav ^ 2 / nk

ut = ut + Sqr(Sv * deltan) * Cos(2 * Pi * (nk) * t + 6.28 * Rnd())
Next k
u = ut * Sqr(2)
End Function
```

## ANEXO C

### DIFERENÇA DO DESLOCAMENTO NO TOPO DA TORRES PARA UMA VENTO ESTÁTICO E DINÂMICO

Deslocamento no topo máx[cm]	espessura perdida[mm]									
VENTO +	0.000	0.050	0.070	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.365
Estático	75.370	75.860	76.056	76.350	76.860	77.370	77.890	78.420	84.190	85.921
% aumento	0.000	0.650	0.910	1.300	1.977	2.654	3.344	4.047	11.702	13.999
Dinamico	84.170	84.690	84.891	85.200	85.740	86.270	86.810	87.350	94.000	95.995
% aumento	11.676	12.366	12.632	13.042	13.759	14.462	15.178	15.895	24.718	27.365

## ANEXO D

### DESLOCAMENTO NO TOPO DA TORRES PARA UMA ANÁLISE LINEAR E NÃO LINEAR DE FORÇAS

Deslocamento no topo máx[cm]	espessura perdida[mm]									
COMB+	0.000	0.050	0.070	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.365
Análise linear	120.470	121.250	121.569	122.040	122.840	123.660	124.490	125.340	134.560	137.326
% aumento	0.000	0.647	0.912	1.303	1.967	2.648	3.337	4.043	11.696	13.992
Análise n linear	121.380	122.160	122.423	122.870	123.770	124.590	125.430	126.280	135.365	138.091
% aumento	0.755	1.403	1.621	1.992	2.739	3.420	4.117	4.823	12.364	14.626

## ANEXO E

### VARIAÇÃO DE ESFORÇOS RESISTENTES E DE CÁLCULO CONFORME A PERDA DE ESPESSURA

MONT 166	espessura perdida[mm]									
	0.000	0.050	0.070	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.365
Nt, rd	1255.990	1245.880	1241.815	1235.740	1225.590	1215.140	1205.280	1195.120	1184.950	1181.899
Ned linear	1113.870	1113.790	1113.790	1113.790	1113.630	1113.550	1113.470	1113.470	1113.310	1113.262
Ned n linear	1122.490	1122.290	1122.490	1122.330	1122.110	1122.020	1122.940	1122.390	1122.250	1122.490
Nb,rd 1 L	1137.190	1128.100	1124.443	1118.980	1109.860	1100.730	1091.510	1082.450	1073.300	1070.555
Nb,rd 0.8	1186.980	1177.470	1173.645	1167.930	1158.390	1148.850	1139.300	1129.740	1120.170	1117.299
Nbrd 0.7	1211.610	1201.900	1197.995	1192.160	1182.410	1172.660	1162.900	1153.140	1143.370	1140.439
Dif linear	142.120	132.090	128.025	121.950	111.960	101.590	91.810	81.650	71.640	68.637
Dif n linear	133.500	123.590	119.325	113.410	103.480	93.120	82.340	72.730	62.700	59.409
% dif linear	100.000	92.943	90.082	85.808	78.778	71.482	64.600	57.451	50.408	48.295
% dif n linear	100.000	92.577	89.382	84.951	77.513	69.753	61.678	54.479	46.966	44.501
Div linear 1L	0.979	0.987	0.991	0.995	1.003	1.012	1.020	1.029	1.037	1.040
Div não linear 1L	0.987	0.995	0.998	1.003	1.011	1.019	1.029	1.037	1.046	1.049
Div linear 0.8L	0.938	0.946	0.949	0.954	0.961	0.969	0.977	0.986	0.994	0.996
Div n linear 0.8L	0.946	0.953	0.956	0.961	0.969	0.977	0.986	0.993	1.002	1.005
Div linear 0.7L	0.919	0.927	0.930	0.934	0.942	0.950	0.957	0.966	0.974	0.976
Div n linear 0.7L	0.926	0.934	0.937	0.941	0.949	0.957	0.966	0.973	0.982	0.984

DIAG 77	espessura perdida[mm]									
	0.000	0.050	0.070	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.365
Nc, rd	244.590	240.670	239.123	236.780	232.830	228.900	224.960	221.020	217.080	215.898
NeD linear	86.070	86.070	86.063	86.060	86.050	86.040	86.030	86.030	86.020	86.017
Ned n linear	86.900	86.900	86.900	86.900	86.900	86.900	86.900	86.900	86.900	86.900
Nb,rD 1L	99.700	98.190	97.586	96.680	95.160	93.640	92.110	90.580	89.040	88.578
Dif linear	158.520	154.600	153.060	150.720	146.780	142.860	138.930	134.990	131.060	129.881
Dif n linear	157.690	153.770	152.223	149.880	145.930	142.000	138.060	134.120	130.180	128.998
% diferença	100.000	97.527	96.556	95.079	92.594	90.121	87.642	85.156	82.677	81.934
% dif n linear	100.000	97.514	96.533	95.047	92.542	90.050	87.552	85.053	82.554	81.805
Div linear 1L	0.863	0.877	0.882	0.890	0.904	0.919	0.934	0.950	0.966	0.971
Div não linear 1L	0.872	0.885	0.890	0.899	0.913	0.928	0.943	0.959	0.976	0.981

TRAV 102	espessura perdida[mm]									
	0.000	0.050	0.070	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.365
Nc, rd	151.580	149.200	148.353	146.970	144.460	142.080	139.700	137.310	134.920	134.203
NeD linear	6.170	6.160	6.149	6.140	6.110	6.090	6.070	6.040	6.020	6.014
Ned n linear	7.570	7.570	7.570	7.570	7.570	7.570	7.570	7.570	7.570	7.570
Nb,rd 1 L	49.070	48.380	48.111	47.700	46.990	46.290	45.580	44.870	44.160	43.947
Nb,rd 0.9	49.070	48.380	48.111	47.700	46.990	46.290	45.580	44.870	44.160	43.947
Nbrd 0.8	58.390	57.560	57.235	56.740	55.890	55.050	54.240	53.360	52.500	52.242
Dif linear	145.410	143.040	142.204	140.830	138.350	135.990	133.630	131.270	128.900	128.906
Dif n linear	144.010	141.630	140.783	139.400	136.890	134.510	132.130	129.740	127.350	127.350
% diferença	100.000	98.370	97.795	96.850	95.145	93.522	91.899	90.276	88.646	88.650
% dif n linear	100.000	98.347	97.759	96.799	95.056	93.403	91.751	90.091	88.431	88.431
Div linear	0.126	0.127	0.128	0.129	0.130	0.132	0.133	0.135	0.136	0.136
Div não linear	0.154	0.156	0.157	0.159	0.161	0.164	0.166	0.169	0.171	0.171
Div linear 0.9L	0.126	0.127	0.128	0.129	0.130	0.132	0.133	0.135	0.136	0.137
Div n linear 0.9L	0.154	0.156	0.157	0.159	0.161	0.164	0.166	0.169	0.171	0.172
Div linear 0.8L	0.106	0.107	0.107	0.108	0.109	0.111	0.112	0.113	0.115	0.115
Div n linear 0.8L	0.130	0.132	0.132	0.133	0.135	0.138	0.140	0.142	0.144	0.145

## ANEXO F

### RESULTADOS DA ANÁLISE DE ENCURVADURA DE BARRAS KO! PARA 0.35 MM DE ESPESSURA PERDIDOS E PARA ANÁLISE LINEAR DE FORÇAS

#### STEEL DESIGN

CODE: *EN 1993-1:2005/A1:2014, Eurocode 3: Design of steel structures.*

ANALYSIS TYPE: *Member Verification*

#### CODE GROUP:

MEMBER: 2  
m

POINT: 1

COORDINATE:  $x = 0.00$   $L = 0.000$

#### LOADS:

Governing Load Case: 20 COMB+ (1+2+3+4+5)\*1.20+(10+6+7+8+9)\*1.60

#### MATERIAL:

S 355 ( S 355 )  $f_y = 355.00$  MPa

#### SECTION PARAMETERS: CIRC 177.8x4.65

$h=177.80$ mm	$gM0=1.00$	$gM1=1.00$	
$b=177.80$ mm	$A_y=16.89$ cm <sup>2</sup>	$A_z=16.89$ cm <sup>2</sup>	$A_x=25.29$ cm <sup>2</sup>
$tw=0.00$ mm	$I_y=948.62$ cm <sup>4</sup>	$I_z=948.62$ cm <sup>4</sup>	$I_x=1739.85$ cm <sup>4</sup>
$tf=0.00$ mm	$W_{ply}=139.43$ cm <sup>3</sup>	$W_{plz}=139.43$ cm <sup>3</sup>	

#### INTERNAL FORCES AND CAPACITIES:

$N_{Ed} = 790.92$ kN	$M_{y,Ed} = 2.84$ kN*m	$M_{z,Ed} = -2.86$ kN*m	$V_{y,Ed} = -2.86$ kN
$N_{c,Rd} = 897.95$ kN	$M_{y,Ed,max} = 2.84$ kN*m	$M_{z,Ed,max} = -2.86$ kN*m	$V_{y,T,Rd} = 346.11$ kN
$N_{b,Rd} = 836.67$ kN	$M_{y,c,Rd} = 49.50$ kN*m	$M_{z,c,Rd} = 49.50$ kN*m	$V_{z,Ed} = -0.15$ kN
	$MN_{y,Rd} = 11.10$ kN*m	$MN_{z,Rd} = 11.10$ kN*m	$V_{z,T,Rd} = 346.11$ kN
			$T_{t,Ed} = -0.02$ kN*m
			Class of section = 1





## LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

### BUCKLING PARAMETERS:



About y axis:

$$L_y = 1.563 \text{ m}$$

$$\text{Lam}_y = 0.33$$

$$\text{Lcr}_y = 1.563 \text{ m}$$

$$X_y = 0.93$$

$$\text{Lamy} = 25.52$$

$$k_{yy} = 0.79$$



About z axis:

$$L_z = 1.563 \text{ m}$$

$$\text{Lam}_z = 0.33$$

$$\text{Lcr}_z = 1.563 \text{ m}$$

$$X_z = 0.93$$

$$\text{Lamz} = 25.52$$

$$k_{yz} = 0.24$$

### VERIFICATION FORMULAS:

#### Section strength check:

$$N_{Ed}/N_{c,Rd} = 0.88 < 1.00 \quad (6.2.4.(1))$$

$$(M_{y,Ed}/M_{N,y,Rd})^{1.00} + (M_{z,Ed}/M_{N,z,Rd})^{1.00} = 0.51 < 1.00 \quad (6.2.9.1.(6))$$

$$V_{y,Ed}/V_{y,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

$$V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

#### Global stability check of member:

$$\text{Lambda}_y = 25.52 < \text{Lambda}_{\text{max}} = 210.00 \quad \text{Lambda}_z = 25.52 < \text{Lambda}_{\text{max}} = 210.00 \quad \text{STABLE}$$

$$N_{Ed}/(X_y \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed,\text{max}}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed,\text{max}}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.00 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N_{Ed}/(X_z \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed,\text{max}}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed,\text{max}}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.99 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

**Não verifica !!!**

## STEEL DESIGN

**CODE:** EN 1993-1:2005/A1:2014, Eurocode 3: Design of steel structures.

**ANALYSIS TYPE:** Member Verification

### CODE GROUP:

**MEMBER:** 70  
m

**POINT:** 1

**COORDINATE:** x = 0.00 L = 0.000

### LOADS:

Governing Load Case: 20 COMB+ (1+2+3+4+5)\*1.20+(10+6+7+8+9)\*1.60

### MATERIAL:

S 355 ( S 355 )  $f_y = 355.00$  MPa

### SECTION PARAMETERS: CIRC 133x3.65

h=133.00 mm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=133.00 mm	Ay=9.90 cm <sup>2</sup>	Az=9.90 cm <sup>2</sup>	Ax=14.83 cm <sup>2</sup>
tw=0.00 mm	Iy=310.45 cm <sup>4</sup>	Iz=310.45 cm <sup>4</sup>	Ix=565.85 cm <sup>4</sup>
tf=0.00 mm	Wply=61.14 cm <sup>3</sup>	Wplz=61.14 cm <sup>3</sup>	

### INTERNAL FORCES AND CAPACITIES:

N,Ed = 479.40 kN	My,Ed = 1.73 kN*m	Mz,Ed = -1.26 kN*m	Vy,Ed = -0.29 kN
Nc,Rd = 526.55 kN	My,Ed,max = 1.73 kN*m	Mz,Ed,max = -1.26 kN*m	Vy,T,Rd = 202.98 kN
Nb,Rd = 490.26 kN	My,c,Rd = 21.70 kN*m	Mz,c,Rd = 21.70 kN*m	Vz,Ed = -2.07 kN
	MN,y,Rd = 3.71 kN*m	MN,z,Rd = 3.71 kN*m	Vz,T,Rd = 202.98 kN
			Tt,Ed = 0.01 kN*m
			Class of section = 1



### LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

### BUCKLING PARAMETERS:



About y axis:

Ly = 1.172 m	Lam_y = 0.34
Lcr,y = 1.172 m	Xy = 0.93
Lamy = 25.62	kzy = 0.26



About z axis:

Lz = 1.172 m	Lam_z = 0.34
Lcr,z = 1.172 m	Xz = 0.93
Lamz = 25.62	kzz = 0.73

### VERIFICATION FORMULAS:

Section strength check:

$$N_{Ed}/N_{c,Rd} = 0.91 < 1.00 \quad (6.2.4.(1))$$

$$(M_{y,Ed}/M_{N,y,Rd})^1 + (M_{z,Ed}/M_{N,z,Rd})^1 = 0.81 < 1.00 \quad (6.2.9.1.(6))$$

$$V_{y,Ed}/V_{y,c,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

$$V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

**Global stability check of member:**

$$\lambda_{y} = 25.62 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \lambda_{z} = 25.62 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$$

$$N_{Ed}/(X_y \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed,max}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.04 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N_{Ed}/(X_z \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed,max}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.04 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

-----  
**Não verifica !!!**

## STEEL DESIGN

**CODE:** EN 1993-1:2005/A1:2014, Eurocode 3: Design of steel structures.

**ANALYSIS TYPE:** Member Verification

### CODE GROUP:

**MEMBER:** 166  
m

**POINT:** 1

**COORDINATE:** x = 0.00 L = 0.000

### LOADS:

Governing Load Case: 20 COMB+ (1+2+3+4+5)\*1.20+(10+6+7+8+9)\*1.60

### MATERIAL:

S 355 ( S 355 )  $f_y = 355.00$  MPa

### SECTION PARAMETERS: CIRC 193.7x5.65

h=193.70 mm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=193.70 mm	Ay=22.29 cm <sup>2</sup>	Az=22.29 cm <sup>2</sup>	Ax=33.38 cm <sup>2</sup>
tw=0.00 mm	Iy=1476.80 cm <sup>4</sup>	Iz=1476.80 cm <sup>4</sup>	Ix=2806.18 cm <sup>4</sup>
tf=0.00 mm	Wply=200.12 cm <sup>3</sup>	Wplz=200.12 cm <sup>3</sup>	

### INTERNAL FORCES AND CAPACITIES:

N,Ed = 1113.31 kN	My,Ed = 3.46 kN*m	Mz,Ed = 3.15 kN*m	Vy,Ed = 3.33 kN
Nc,Rd = 1184.95 kN	My,Ed,max = 3.96 kN*m	Mz,Ed,max = -3.37 kN*m	Vy,T,Rd = 456.89 kN
Nb,Rd = 1120.17 kN	My,c,Rd = 71.04 kN*m	Mz,c,Rd = 71.04 kN*m	Vz,Ed = 0.27 kN
	MN,y,Rd = 8.33 kN*m	MN,z,Rd = 8.33 kN*m	Vz,T,Rd = 456.89 kN
			Tt,Ed = -0.01 kN*m
			Class of section = 1



### LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

### BUCKLING PARAMETERS:



About y axis:

Ly = 1.563 m	Lam_y = 0.31
Lcr,y = 1.563 m	Xy = 0.95
Lamy = 23.49	ky = 0.75



About z axis:

Lz = 1.563 m	Lam_z = 0.31
Lcr,z = 1.563 m	Xz = 0.95
Lamz = 23.49	kyz = 0.23

### VERIFICATION FORMULAS:

Section strength check:

$$N_{Ed}/N_{c,Rd} = 0.94 < 1.00 \quad (6.2.4.(1))$$

$$(M_{y,Ed}/M_{N,y,Rd})^1.00 + (M_{z,Ed}/M_{N,z,Rd})^1.00 = 0.79 < 1.00 \quad (6.2.9.1.(6))$$

$$V_{y,Ed}/V_{y,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

$$V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

**Global stability check of member:**

$$\lambda_{y} = 23.49 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \lambda_{z} = 23.49 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$$

$$N_{Ed}/(X_y \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed,max}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.05 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N_{Ed}/(X_z \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed,max}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.04 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

-----  
**Não verifica !!!**

## STEEL DESIGN

**CODE:** EN 1993-1:2005/A1:2014, Eurocode 3: Design of steel structures.

**ANALYSIS TYPE:** Member Verification

### CODE GROUP:

**MEMBER:** 197  
m

**POINT:** 1

**COORDINATE:** x = 0.00 L = 0.000

### LOADS:

Governing Load Case: 20 COMB+ (1+2+3+4+5)\*1.20+(10+6+7+8+9)\*1.60

### MATERIAL:

S 355 ( S 355 )  $f_y = 355.00$  MPa

### SECTION PARAMETERS: CIRC 193.7x9.65

h=193.70 mm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=193.70 mm	Ay=25.54 cm <sup>2</sup>	Az=25.54 cm <sup>2</sup>	Ax=38.23 cm <sup>2</sup>
tw=0.00 mm	Iy=1676.54 cm <sup>4</sup>	Iz=1676.54 cm <sup>4</sup>	Ix=3220.29 cm <sup>4</sup>
tf=0.00 mm	Wply=228.00 cm <sup>3</sup>	Wplz=228.00 cm <sup>3</sup>	

### INTERNAL FORCES AND CAPACITIES:

N,Ed = 1759.56 kN	My,Ed = 5.36 kN*m	Mz,Ed = 3.46 kN*m	Vy,Ed = 3.78 kN
Nc,Rd = 1357.05 kN	My,Ed,max = 5.36 kN*m	Mz,Ed,max = -3.93 kN*m	Vy,T,Rd = 523.54 kN
Nb,Rd = 1281.94 kN	My,c,Rd = 80.94 kN*m	Mz,c,Rd = 80.94 kN*m	Vz,Ed = -0.18 kN
			Vz,T,Rd = 523.54 kN
			Tt,Ed = 0.01 kN*m
			Class of section = 1



### LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

### BUCKLING PARAMETERS:



About y axis:

Ly = 1.563 m	Lam_y = 0.31
Lcr,y = 1.563 m	Xy = 0.94
Lamy = 23.60	ky = 0.71



About z axis:

Lz = 1.563 m	Lam_z = 0.31
Lcr,z = 1.563 m	Xz = 0.94
Lamz = 23.60	kyz = 0.21

### VERIFICATION FORMULAS:

Section strength check:

$$N_{Ed}/N_{c,Rd} = 1.30 > 1.00 \quad (6.2.4.(1))$$

$$V_{y,Ed}/V_{y,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

$$V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

**Global stability check of member:**

$$\lambda_{y} = 23.60 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \lambda_{z} = 23.60 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$$

$$N_{Ed}/(X_y \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed,max}/(X_{LT} \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.43 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N_{Ed}/(X_z \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed,max}/(X_{LT} \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.42 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

-----  
**Não verifica !!!**

## STEEL DESIGN

**CODE:** EN 1993-1:2005/A1:2014, Eurocode 3: Design of steel structures.

**ANALYSIS TYPE:** Member Verification

### CODE GROUP:

**MEMBER:** 198  
m

**POINT:** 1

**COORDINATE:** x = 0.00 L = 0.000

### LOADS:

Governing Load Case: 20 COMB+ (1+2+3+4+5)\*1.20+(10+6+7+8+9)\*1.60

### MATERIAL:

S 355 ( S 355 )  $f_y = 355.00$  MPa

### SECTION PARAMETERS: CIRC 193.7x9.65

h=193.70 mm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=193.70 mm	Ay=25.54 cm <sup>2</sup>	Az=25.54 cm <sup>2</sup>	Ax=38.23 cm <sup>2</sup>
tw=0.00 mm	Iy=1676.54 cm <sup>4</sup>	Iz=1676.54 cm <sup>4</sup>	Ix=3220.29 cm <sup>4</sup>
tf=0.00 mm	Wply=228.00 cm <sup>3</sup>	Wplz=228.00 cm <sup>3</sup>	

### INTERNAL FORCES AND CAPACITIES:

N,Ed = 1655.13 kN	My,Ed = 5.11 kN*m	Mz,Ed = -3.93 kN*m	Vy,Ed = -3.98 kN
Nc,Rd = 1357.05 kN	My,Ed,max = 5.11 kN*m	Mz,Ed,max = -3.93 kN*m	Vy,T,Rd = 523.54 kN
Nb,Rd = 1281.94 kN	My,c,Rd = 80.94 kN*m	Mz,c,Rd = 80.94 kN*m	Vz,Ed = -0.03 kN
			Vz,T,Rd = 523.54 kN
			Tt,Ed = 0.00 kN*m
			Class of section = 1



### LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

### BUCKLING PARAMETERS:



About y axis:

Ly = 1.563 m	Lam_y = 0.31
Lcr,y = 1.563 m	Xy = 0.94
Lamy = 23.60	ky = 0.73



About z axis:

Lz = 1.563 m	Lam_z = 0.31
Lcr,z = 1.563 m	Xz = 0.94
Lamz = 23.60	kyz = 0.21

### VERIFICATION FORMULAS:

Section strength check:



$$N_{Ed}/N_{c,Rd} = 1.22 > 1.00 \quad (6.2.4.(1))$$

$$V_{y,Ed}/V_{y,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

$$V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

**Global stability check of member:**

$$\lambda_{y} = 23.60 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \lambda_{z} = 23.60 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$$

$$N_{Ed}/(X_y \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed,max}/(X_{LT} \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.35 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N_{Ed}/(X_z \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed,max}/(X_{LT} \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.33 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

-----  
**Não verifica !!!**

## STEEL DESIGN

**CODE:** EN 1993-1:2005/A1:2014, Eurocode 3: Design of steel structures.

**ANALYSIS TYPE:** Member Verification

### CODE GROUP:

**MEMBER:** 199  
m

**POINT:** 1

**COORDINATE:** x = 0.00 L = 0.000

### LOADS:

Governing Load Case: 20 COMB+ (1+2+3+4+5)\*1.20+(10+6+7+8+9)\*1.60

### MATERIAL:

S 355 ( S 355 )  $f_y = 355.00$  MPa

### SECTION PARAMETERS: CIRC 193.7x9.65

h=193.70 mm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=193.70 mm	Ay=25.54 cm <sup>2</sup>	Az=25.54 cm <sup>2</sup>	Ax=38.23 cm <sup>2</sup>
tw=0.00 mm	Iy=1676.54 cm <sup>4</sup>	Iz=1676.54 cm <sup>4</sup>	Ix=3220.29 cm <sup>4</sup>
tf=0.00 mm	Wply=228.00 cm <sup>3</sup>	Wplz=228.00 cm <sup>3</sup>	

### INTERNAL FORCES AND CAPACITIES:

N,Ed = 1545.54 kN	My,Ed = 5.17 kN*m	Mz,Ed = 3.85 kN*m	Vy,Ed = 3.74 kN
Nc,Rd = 1357.05 kN	My,Ed,max = 5.17 kN*m	Mz,Ed,max = 3.85 kN*m	Vy,T,Rd = 523.54 kN
Nb,Rd = 1281.94 kN	My,c,Rd = 80.94 kN*m	Mz,c,Rd = 80.94 kN*m	Vz,Ed = -0.74 kN
			Vz,T,Rd = 523.54 kN
			Tt,Ed = 0.01 kN*m
			Class of section = 1



### LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

### BUCKLING PARAMETERS:



About y axis:

Ly = 1.563 m	Lam_y = 0.31
Lcr,y = 1.563 m	Xy = 0.94
Lamy = 23.60	ky = 0.68



About z axis:

Lz = 1.563 m	Lam_z = 0.31
Lcr,z = 1.563 m	Xz = 0.94
Lamz = 23.60	kyz = 0.22

### VERIFICATION FORMULAS:

Section strength check:

$$N_{Ed}/N_{c,Rd} = 1.14 > 1.00 \quad (6.2.4.(1))$$

$$V_{y,Ed}/V_{y,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

$$V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

**Global stability check of member:**

$$\lambda_{y} = 23.60 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \lambda_{z} = 23.60 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$$

$$N_{Ed}/(X_y \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed,max}/(X_{LT} \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.26 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N_{Ed}/(X_z \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed,max}/(X_{LT} \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.25 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

-----  
**Não verifica !!!**

## STEEL DESIGN

**CODE:** EN 1993-1:2005/A1:2014, Eurocode 3: Design of steel structures.

**ANALYSIS TYPE:** Member Verification

### CODE GROUP:

**MEMBER:** 200  
1.953 m

**POINT:** 3

**COORDINATE:** x = 1.00 L =

### LOADS:

Governing Load Case: 22 COMB30 (1+2+3+4+5)\*1.20+(12+6+7+8+9)\*1.60

### MATERIAL:

S 355 ( S 355 )  $f_y = 355.00$  MPa

### SECTION PARAMETERS: CIRC 193.7x9.65

h=193.70 mm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=193.70 mm	Ay=25.54 cm <sup>2</sup>	Az=25.54 cm <sup>2</sup>	Ax=38.23 cm <sup>2</sup>
tw=0.00 mm	Iy=1676.54 cm <sup>4</sup>	Iz=1676.54 cm <sup>4</sup>	Ix=3220.29 cm <sup>4</sup>
tf=0.00 mm	Wply=228.00 cm <sup>3</sup>	Wplz=228.00 cm <sup>3</sup>	

### INTERNAL FORCES AND CAPACITIES:

N,Ed = -1444.46 kN	My,Ed = -1.46 kN*m	Mz,Ed = 5.61 kN*m	Vy,Ed = -2.98 kN
Nt,Rd = 1357.05 kN	My,pl,Rd = 80.94 kN*m	Mz,pl,Rd = 80.94 kN*m	Vy,T,Rd = 523.54 kN
	My,c,Rd = 80.94 kN*m	Mz,c,Rd = 80.94 kN*m	Vz,Ed = 3.00 kN
			Vz,T,Rd = 523.54 kN
			Tt,Ed = -0.06 kN*m
			Class of section = 1



### LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

### BUCKLING PARAMETERS:



About y axis:



About z axis:

### VERIFICATION FORMULAS:

Section strength check:

$$N_{Ed}/N_{t,Rd} = 1.06 > 1.00 \quad (6.2.3.(1))$$

$$V_{y,Ed}/V_{y,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

$$V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

-----  
***Não verifica !!!***

## STEEL DESIGN

**CODE:** EN 1993-1:2005/A1:2014, Eurocode 3: Design of steel structures.

**ANALYSIS TYPE:** Member Verification

**CODE GROUP:**

**MEMBER:** 201  
1.953 m

**POINT:** 3

**COORDINATE:** x = 1.00 L =

**LOADS:**

Governing Load Case: 22 COMB30 (1+2+3+4+5)\*1.20+(12+6+7+8+9)\*1.60

**MATERIAL:**

S 355 ( S 355 )  $f_y = 355.00$  MPa

### SECTION PARAMETERS: CIRC 193.7x9.65

h=193.70 mm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=193.70 mm	Ay=25.54 cm <sup>2</sup>	Az=25.54 cm <sup>2</sup>	Ax=38.23 cm <sup>2</sup>
tw=0.00 mm	Iy=1676.54 cm <sup>4</sup>	Iz=1676.54 cm <sup>4</sup>	Ix=3220.29 cm <sup>4</sup>
tf=0.00 mm	Wply=228.00 cm <sup>3</sup>	Wplz=228.00 cm <sup>3</sup>	

### INTERNAL FORCES AND CAPACITIES:

N <sub>Ed</sub> = -1386.59 kN	M <sub>y,Ed</sub> = -7.06 kN*m	M <sub>z,Ed</sub> = -0.39 kN*m	V <sub>y,Ed</sub> = 3.08 kN
N <sub>t,Rd</sub> = 1357.05 kN	M <sub>y,pl,Rd</sub> = 80.94 kN*m	M <sub>z,pl,Rd</sub> = 80.94 kN*m	V <sub>y,T,Rd</sub> = 523.54 kN
	M <sub>y,c,Rd</sub> = 80.94 kN*m	M <sub>z,c,Rd</sub> = 80.94 kN*m	V <sub>z,Ed</sub> = -2.85 kN
			V <sub>z,T,Rd</sub> = 523.54 kN
			T <sub>t,Ed</sub> = -0.05 kN*m
			Class of section = 1



### LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

### BUCKLING PARAMETERS:



About y axis:



About z axis:

### VERIFICATION FORMULAS:

Section strength check:

$$N_{Ed}/N_{t,Rd} = 1.02 > 1.00 \quad (6.2.3.(1))$$

$$V_{y,Ed}/V_{y,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

$$V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

-----  
***Não verifica !!!***

## STEEL DESIGN

**CODE:** EN 1993-1:2005/A1:2014, Eurocode 3: Design of steel structures.

**ANALYSIS TYPE:** Member Verification

### CODE GROUP:

**MEMBER:** 203  
m

**POINT:** 1

**COORDINATE:** x = 0.00 L = 0.000

### LOADS:

Governing Load Case: 22 COMB30 (1+2+3+4+5)\*1.20+(12+6+7+8+9)\*1.60

### MATERIAL:

S 355 ( S 355 )  $f_y = 355.00$  MPa

### SECTION PARAMETERS: CIRC 193.7x9.65

h=193.70 mm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=193.70 mm	Ay=25.54 cm <sup>2</sup>	Az=25.54 cm <sup>2</sup>	Ax=38.23 cm <sup>2</sup>
tw=0.00 mm	Iy=1676.54 cm <sup>4</sup>	Iz=1676.54 cm <sup>4</sup>	Ix=3220.29 cm <sup>4</sup>
tf=0.00 mm	Wply=228.00 cm <sup>3</sup>	Wplz=228.00 cm <sup>3</sup>	

### INTERNAL FORCES AND CAPACITIES:

N,Ed = 1518.34 kN	My,Ed = 1.66 kN*m	Mz,Ed = 5.34 kN*m	Vy,Ed = 3.13 kN
Nc,Rd = 1357.05 kN	My,Ed,max = 7.12 kN*m	Mz,Ed,max = 5.34 kN*m	Vy,T,Rd = 523.54 kN
Nb,Rd = 1281.94 kN	My,c,Rd = 80.94 kN*m	Mz,c,Rd = 80.94 kN*m	Vz,Ed = 2.80 kN
			Vz,T,Rd = 523.54 kN
			Tt,Ed = -0.00 kN*m
			Class of section = 1



### LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

### BUCKLING PARAMETERS:



About y axis:

Ly = 1.563 m	Lam_y = 0.31
Lcr,y = 1.563 m	Xy = 0.94
Lamy = 23.60	ky = 0.58



About z axis:

Lz = 1.563 m	Lam_z = 0.31
Lcr,z = 1.563 m	Xz = 0.94
Lamz = 23.60	kyz = 0.30

### VERIFICATION FORMULAS:

Section strength check:



$$N_{Ed}/N_{c,Rd} = 1.12 > 1.00 \quad (6.2.4.(1))$$

$$V_{y,Ed}/V_{y,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

$$V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

**Global stability check of member:**

$$\lambda_{y} = 23.60 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \lambda_{z} = 23.60 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$$

$$N_{Ed}/(X_y \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed,max}/(X_{LT} \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.26 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N_{Ed}/(X_z \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed,max}/(X_{LT} \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.25 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

---

**Não verifica !!!**

## STEEL DESIGN

**CODE:** EN 1993-1:2005/A1:2014, Eurocode 3: Design of steel structures.

**ANALYSIS TYPE:** Member Verification

### CODE GROUP:

**MEMBER:** 204  
m

**POINT:** 1

**COORDINATE:** x = 0.00 L = 0.000

### LOADS:

Governing Load Case: 22 COMB30 (1+2+3+4+5)\*1.20+(12+6+7+8+9)\*1.60

### MATERIAL:

S 355 ( S 355 )  $f_y = 355.00$  MPa

### SECTION PARAMETERS: CIRC 193.7x9.65

h=193.70 mm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=193.70 mm	Ay=25.54 cm <sup>2</sup>	Az=25.54 cm <sup>2</sup>	Ax=38.23 cm <sup>2</sup>
tw=0.00 mm	Iy=1676.54 cm <sup>4</sup>	Iz=1676.54 cm <sup>4</sup>	Ix=3220.29 cm <sup>4</sup>
tf=0.00 mm	Wply=228.00 cm <sup>3</sup>	Wplz=228.00 cm <sup>3</sup>	

### INTERNAL FORCES AND CAPACITIES:

N,Ed = 1400.57 kN	My,Ed = 7.23 kN*m	Mz,Ed = -0.76 kN*m	Vy,Ed = -3.39 kN
Nc,Rd = 1357.05 kN	My,Ed,max = 7.23 kN*m	Mz,Ed,max = 5.86 kN*m	Vy,T,Rd = 523.54 kN
Nb,Rd = 1281.94 kN	My,c,Rd = 80.94 kN*m	Mz,c,Rd = 80.94 kN*m	Vz,Ed = -2.91 kN
			Vz,T,Rd = 523.54 kN
			Tt,Ed = -0.00 kN*m
			Class of section = 1



### LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

### BUCKLING PARAMETERS:



About y axis:

$L_y = 1.563$ m	$\lambda_{M_y} = 0.31$
$L_{cr,y} = 1.563$ m	$X_y = 0.94$
$\lambda_{M_y} = 23.60$	$k_{yy} = 0.59$



About z axis:

$L_z = 1.563$ m	$\lambda_{M_z} = 0.31$
$L_{cr,z} = 1.563$ m	$X_z = 0.94$
$\lambda_{M_z} = 23.60$	$k_{yz} = 0.31$

### VERIFICATION FORMULAS:

**Section strength check:**

$$N_{Ed}/N_{c,Rd} = 1.03 > 1.00 \quad (6.2.4.(1))$$

$$V_{y,Ed}/V_{y,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

$$V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

**Global stability check of member:**

$$\lambda_{y} = 23.60 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \lambda_{z} = 23.60 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$$

$$N_{Ed}/(X_y \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed,max}/(X_{LT} \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.17 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N_{Ed}/(X_z \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed,max}/(X_{LT} \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.16 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

-----  
**Não verifica !!!**

## STEEL DESIGN

**CODE:** EN 1993-1:2005/A1:2014, Eurocode 3: Design of steel structures.

**ANALYSIS TYPE:** Member Verification

### CODE GROUP:

**MEMBER:** 205  
m

**POINT:** 1

**COORDINATE:** x = 0.00 L = 0.000

### LOADS:

Governing Load Case: 22 COMB30 (1+2+3+4+5)\*1.20+(12+6+7+8+9)\*1.60

### MATERIAL:

S 355 ( S 355 )  $f_y = 355.00$  MPa

### SECTION PARAMETERS: CIRC 193.7x9.65

h=193.70 mm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=193.70 mm	Ay=25.54 cm <sup>2</sup>	Az=25.54 cm <sup>2</sup>	Ax=38.23 cm <sup>2</sup>
tw=0.00 mm	Iy=1676.54 cm <sup>4</sup>	Iz=1676.54 cm <sup>4</sup>	Ix=3220.29 cm <sup>4</sup>
tf=0.00 mm	Wply=228.00 cm <sup>3</sup>	Wplz=228.00 cm <sup>3</sup>	

### INTERNAL FORCES AND CAPACITIES:

N,Ed = 1338.10 kN	My,Ed = 1.64 kN*m	Mz,Ed = 5.88 kN*m	Vy,Ed = 3.65 kN
Nc,Rd = 1357.05 kN	My,Ed,max = 5.78 kN*m	Mz,Ed,max = 5.88 kN*m	Vy,T,Rd = 523.54 kN
Nb,Rd = 1281.94 kN	My,c,Rd = 80.94 kN*m	Mz,c,Rd = 80.94 kN*m	Vz,Ed = 2.13 kN
	MN,y,Rd = 2.25 kN*m	MN,z,Rd = 2.25 kN*m	Vz,T,Rd = 523.54 kN
			Tt,Ed = -0.01 kN*m
			Class of section = 1



### LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

### BUCKLING PARAMETERS:



About y axis:

Ly = 1.563 m	Lam_y = 0.31
Lcr,y = 1.563 m	Xy = 0.94
Lamy = 23.60	ky = 0.61



About z axis:

Lz = 1.563 m	Lam_z = 0.31
Lcr,z = 1.563 m	Xz = 0.94
Lamz = 23.60	kyz = 0.31

### VERIFICATION FORMULAS:

Section strength check:

$$N_{Ed}/N_{c,Rd} = 0.99 < 1.00 \quad (6.2.4.(1))$$

$$(M_{y,Ed}/M_{N,y,Rd})^1 + (M_{z,Ed}/M_{N,z,Rd})^1 = 3.35 > 1.00 \quad (6.2.9.1.(6))$$

$$V_{y,Ed}/V_{y,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

$$V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

**Global stability check of member:**

$$\lambda_{y} = 23.60 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \lambda_{z} = 23.60 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$$

$$N_{Ed}/(X_y \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed,max}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.11 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N_{Ed}/(X_z \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed,max}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.11 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

-----  
**Não verifica !!!**

## STEEL DESIGN

**CODE:** EN 1993-1:2005/A1:2014, Eurocode 3: Design of steel structures.

**ANALYSIS TYPE:** Member Verification

### CODE GROUP:

**MEMBER:** 209  
m

**POINT:** 1

**COORDINATE:** x = 0.00 L = 0.000

### LOADS:

Governing Load Case: 20 COMB+ (1+2+3+4+5)\*1.20+(10+6+7+8+9)\*1.60

### MATERIAL:

S 355 ( S 355 )  $f_y = 355.00$  MPa

### SECTION PARAMETERS: CIRC 244.5x9.65

h=244.50 mm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=244.50 mm	Ay=47.62 cm <sup>2</sup>	Az=47.62 cm <sup>2</sup>	Ax=71.20 cm <sup>2</sup>
tw=0.00 mm	Iy=4916.90 cm <sup>4</sup>	Iz=4916.90 cm <sup>4</sup>	Ix=9104.87 cm <sup>4</sup>
tf=0.00 mm	Wply=532.83 cm <sup>3</sup>	Wplz=532.83 cm <sup>3</sup>	

### INTERNAL FORCES AND CAPACITIES:

N,Ed = 2393.59 kN	My,Ed = 13.39 kN*m	Mz,Ed = 5.18 kN*m	Vy,Ed = 4.39 kN
Nc,Rd = 2527.53 kN	My,Ed,max = 13.39 kN*m	Mz,Ed,max = 5.18 kN*m	Vy,T,Rd = 975.96 kN
Nb,Rd = 2468.27 kN	My,c,Rd = 189.16 kN*m	Mz,c,Rd = 189.16 kN*m	Vz,Ed = -2.39 kN
	MN,y,Rd = 19.52 kN*m	MN,z,Rd = 19.52 kN*m	Vz,T,Rd = 975.96 kN
			Tt,Ed = 0.01 kN*m
			Class of section = 1



### LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

### BUCKLING PARAMETERS:



About y axis:

Ly = 1.563 m	Lam_y = 0.25
Lcr,y = 1.563 m	Xy = 0.98
Lamy = 18.80	ky = 0.65



About z axis:

Lz = 1.563 m	Lam_z = 0.25
Lcr,z = 1.563 m	Xz = 0.98
Lamz = 18.80	kyz = 0.25

### VERIFICATION FORMULAS:

Section strength check:

$$N_{Ed}/N_{c,Rd} = 0.95 < 1.00 \quad (6.2.4.(1))$$

$$(M_{y,Ed}/M_{N,y,Rd})^1 + (M_{z,Ed}/M_{N,z,Rd})^1 = 0.95 < 1.00 \quad (6.2.9.1.(6))$$

$$V_{y,Ed}/V_{y,c,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

$$V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

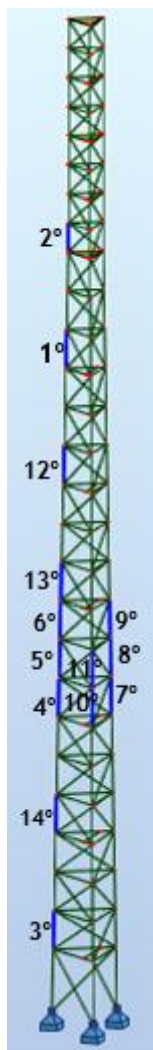
**Global stability check of member:**

$$\lambda_{y} = 18.80 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \lambda_{z} = 18.80 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$$

$$N_{Ed}/(X_y \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed,max}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.02 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N_{Ed}/(X_z \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed,max}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed,max}/(M_{z,Rk}/gM1) = 1.01 > 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

-----  
**Não verifica !!!**





## ANEXO G

### FORÇAS RESISTENTES E DE CÁLCULO EM FUNÇÃO DO TEMPO

	ambiente rural											
	t[anos]	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
	esp[mm]	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	Nrd	1255.99	1253.07	1252.24	1251.65	1251.18	1250.77	1250.42	1250.10	1249.81	1249.54	1249.29
	Ned	1113.87	1113.85	1113.84	1113.84	1113.83	1113.83	1113.83	1113.82	1113.82	1113.82	1113.82
montante (166)	t[anos]	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
	esp[mm]	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	Nrd	244.59	243.46	243.14	242.91	242.72	242.57	242.43	242.31	242.19	242.09	241.99
	Ned	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07
	Ned	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07
diagonal (77)	t[anos]	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
	esp[mm]	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	Nrd	244.59	243.46	243.14	242.91	242.72	242.57	242.43	242.31	242.19	242.09	241.99
	Ned	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07
	Ned	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07
travessa (102)	t[anos]	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
	esp[mm]	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	Nrd	151.58	150.89	150.70	150.56	150.45	150.35	150.27	150.19	150.13	150.06	150.00
	Ned	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16
	Ned	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16
	ambiente urbano											
	t[anos]	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
	esp[mm]	0.00	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06
	Nrd	1255.99	1250.57	1249.03	1247.94	1247.06	1246.31	1245.65	1245.06	1244.52	1244.02	1243.56
	Ned	1113.87	1113.83	1113.81	1113.81	1113.80	1113.79	1113.79	1113.79	1113.79	1113.79	1113.79
montante (166)	t[anos]	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
	esp[mm]	0.00	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06
	Nrd	244.59	242.49	241.89	241.47	241.13	240.84	240.58	240.35	240.15	239.95	239.77
	Ned	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07
	Ned	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07
diagonal (77)	t[anos]	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
	esp[mm]	0.00	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06
	Nrd	244.59	242.49	241.89	241.47	241.13	240.84	240.58	240.35	240.15	239.95	239.77
	Ned	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07
	Ned	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07
travessa (102)	t[anos]	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
	esp[mm]	0.00	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06
	Nrd	151.58	150.30	149.94	149.68	149.48	149.30	149.15	149.01	148.88	148.76	148.66
	Ned	6.17	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16
	Ned	6.17	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16
	ambiente Industrial											
	t[anos]	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
	esp[mm]	0.00	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07
	Nrd	1255.99	1249.51	1247.67	1246.36	1245.31	1244.41	1243.62	1242.92	1242.27	1241.68	1241.12
	Ned	1113.87	1113.82	1113.80	1113.79	1113.79	1113.79	1113.79	1113.79	1113.79	1113.79	1113.79
montante (166)	t[anos]	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
	esp[mm]	0.00	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07
	Nrd	244.59	242.08	241.36	240.86	240.45	240.10	239.80	239.52	239.28	239.04	238.83
	Ned	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07
	Ned	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07
diagonal (77)	t[anos]	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
	esp[mm]	0.00	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07
	Nrd	244.59	242.08	241.36	240.86	240.45	240.10	239.80	239.52	239.28	239.04	238.83
	Ned	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07
	Ned	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07	86.07
travessa (102)	t[anos]	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
	esp[mm]	0.00	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07
	Nrd	151.58	150.05	149.62	149.31	149.07	148.86	148.67	148.50	148.35	148.21	148.08
	Ned	6.17	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16
	Ned	6.17	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16

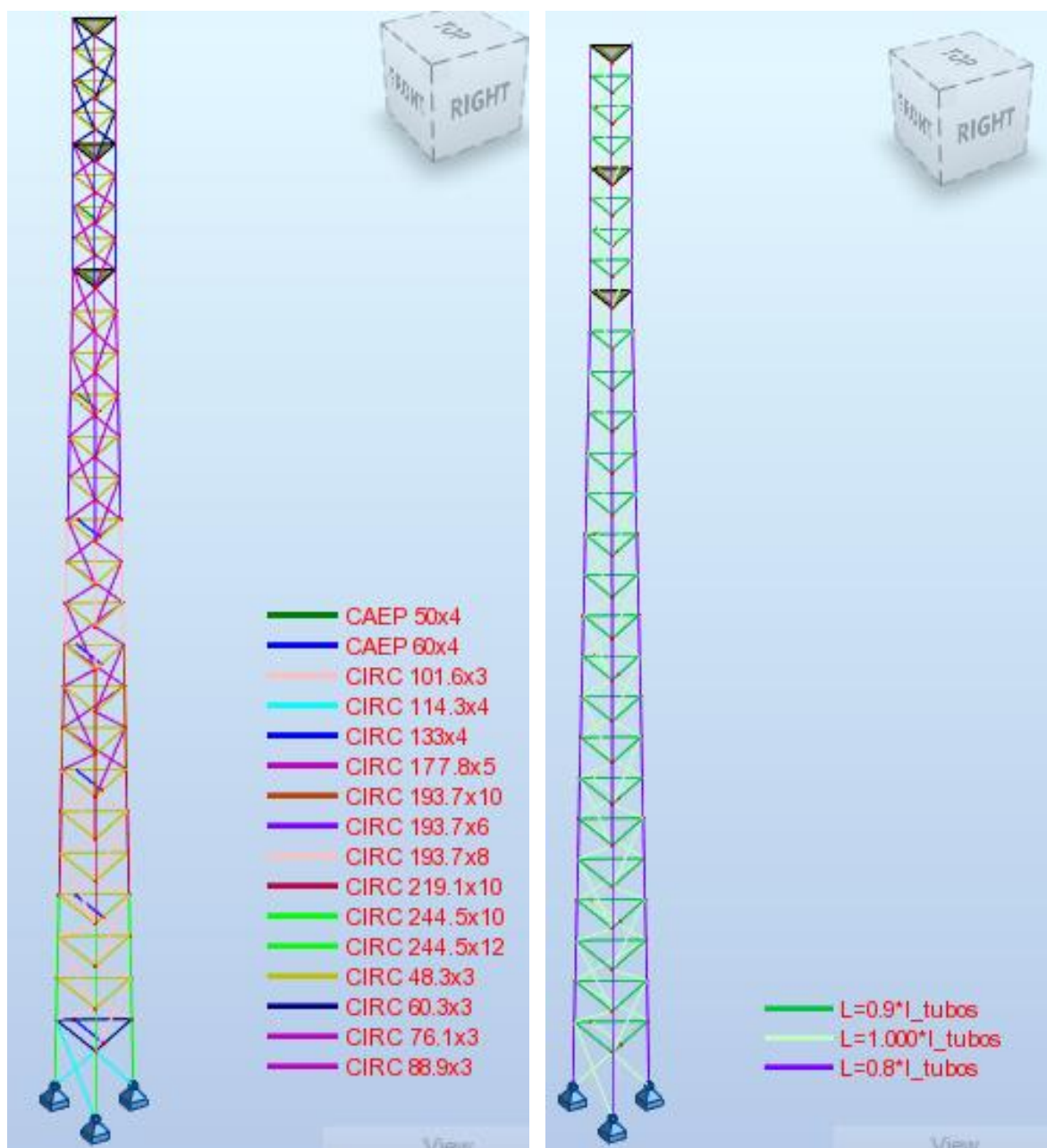
Simulação do efeito da corrosão na verificação da segurança estrutural de uma torre metálica degradada

montante (166)	ambiente marinho											
	t[anos]	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
	esp[mm]	0.00	0.13	0.17	0.20	0.22	0.24	0.26	0.27	0.28	0.30	0.31
	Nrd	1255.99	1228.87	1221.04	1215.40	1211.11	1207.47	1204.25	1201.29	1198.59	1196.10	1193.78
	Ned	1113.87	1113.68	1113.60	1113.55	1113.52	1113.49	1113.47	1113.47	1113.47	1113.47	1113.45
diagonal (77)	t[anos]	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
	esp[mm]	0.00	0.13	0.17	0.20	0.22	0.24	0.26	0.27	0.28	0.30	0.31
	Nrd	244.59	234.11	231.12	229.00	227.29	225.84	224.56	223.41	222.37	221.40	220.50
	Ned	86.07	86.06	86.05	86.04	86.04	86.03	86.04	86.04	86.03	86.03	86.03
	t[anos]	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
travessa (102)	esp[mm]	0.00	0.13	0.17	0.20	0.22	0.24	0.26	0.27	0.28	0.30	0.31
	Nrd	151.58	145.27	143.42	142.14	141.11	140.23	139.46	138.76	138.13	137.54	137.00
	Ned	6.17	6.12	6.10	6.09	6.08	6.07	6.07	6.06	6.05	6.04	6.04

montante (166)	ambiente industrial e marinho											
	t[anos]	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
	esp[mm]	0.00	0.16	0.20	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.336	0.35	0.36
	Nrd	1255.99	1223.68	1214.30	1207.97	1202.81	1198.36	1194.44	1190.92	1187.71	1184.95	1181.90
	Ned	1113.87	1113.54	1113.54	1113.49	1113.47	1113.47	1113.47	1113.30	1113.24	1113.40	1113.26
diagonal (77)	t[anos]	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
	esp[mm]	0.00	0.16	0.20	0.24	0.26	0.28	0.303	0.32	0.34	0.35	0.36
	Nrd	244.59	232.11	228.57	226.04	224.00	222.28	220.757	219.39	218.15	217.08	215.90
	Ned	86.07	86.05	86.04	86.03	86.03	86.03	86.029	86.03	86.02	86.02	86.02
	t[anos]	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
travessa (102)	esp[mm]	0.00	0.16	0.20	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.35	0.36
	Nrd	151.58	144.02	141.88	140.35	139.12	138.07	137.15	136.32	135.57	134.92	134.20
	Ned	6.17	6.09	6.09	6.08	6.06	6.05	6.04	6.03	6.03	6.02	6.01

## ANEXO H

### VISTA GERAL DA TORRE



## ANEXO I

### PROPRIEDADES DAS BARRAS

Barra	Nó 1	Nó 2	Secção	Material	Comprimento(m)	Inclinação(°)	Tipo
1	11	10	CAEP 50x4	S 355	1.433	-44.99998	L=1.000*I_tubos
2	62	1	CIRC 177.8x5	S 355	1.953	0.00023	L=0.8*I_tubos
3	1	19	CIRC 177.8x5	S 355	1.953	0.00023	L=0.8*I_tubos
4	14	16	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*I_tubos
5	16	15	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*I_tubos
6	15	14	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*I_tubos
7	4	7	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*I_tubos
8	7	18	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*I_tubos
9	18	4	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*I_tubos
10	5	8	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*I_tubos
11	8	2	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*I_tubos
12	2	5	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*I_tubos
13	6	9	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*I_tubos
14	9	3	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*I_tubos
15	3	6	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*I_tubos
16	14	9	CIRC 60.3x3	S 355	2.244	-134.99994	L=1.000*I_tubos
17	5	7	CIRC 60.3x3	S 355	2.244	-134.99994	L=1.000*I_tubos
18	16	3	CIRC 60.3x3	S 355	2.244	-134.99994	L=1.000*I_tubos
19	8	18	CIRC 60.3x3	S 355	2.244	-134.99994	L=1.000*I_tubos
20	15	6	CIRC 60.3x3	S 355	2.244	-134.99994	L=1.000*I_tubos
21	2	4	CIRC 60.3x3	S 355	2.244	-134.99994	L=1.000*I_tubos
23	29	18	CIRC 88.9x3	S 355	1.465	0.00023	L=0.8*I_tubos
24	9	5	CIRC 60.3x3	S 355	2.244	-44.99998	L=1.000*I_tubos
25	7	30	CIRC 60.3x3	S 355	2.244	-44.99998	L=1.000*I_tubos
26	3	8	CIRC 60.3x3	S 355	2.244	-44.99998	L=1.000*I_tubos
27	18	31	CIRC 60.3x3	S 355	2.244	-44.99998	L=1.000*I_tubos
28	6	2	CIRC 60.3x3	S 355	2.244	-44.99998	L=1.000*I_tubos
29	4	29	CIRC 60.3x3	S 355	2.244	-44.99998	L=1.000*I_tubos
30	19	32	CIRC 177.8x5	S 355	1.953	0.00023	L=0.8*I_tubos
31	66	20	CIRC 177.8x5	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
32	34	35	CAEP 50x4	S 355	1.433	-44.99998	L=1.000*I_tubos
33	20	21	CIRC 177.8x5	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
34	21	36	CIRC 177.8x5	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
35	30	31	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*I_tubos
36	31	29	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*I_tubos
37	29	30	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*I_tubos
38	39	40	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*I_tubos
39	40	41	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*I_tubos
40	41	39	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*I_tubos

41	42	43	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*_tubos
42	43	44	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*_tubos
43	44	42	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*_tubos
44	45	46	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*_tubos
45	46	47	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*_tubos
46	47	45	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*_tubos
47	30	46	CIRC 76.1x3	S 355	2.244	-134.99994	L=1.000*_tubos
48	47	43	CIRC 76.1x3	S 355	2.244	-44.99998	L=1.000*_tubos
49	42	40	CIRC 76.1x3	S 355	2.244	-134.99994	L=1.000*_tubos
50	41	37	CIRC 76.1x3	S 355	2.244	-44.99998	L=1.000*_tubos
51	31	47	CIRC 76.1x3	S 355	2.244	-134.99994	L=1.000*_tubos
52	45	44	CIRC 76.1x3	S 355	2.244	-44.99998	L=1.000*_tubos
53	43	41	CIRC 76.1x3	S 355	2.244	-134.99994	L=1.000*_tubos
54	39	32	CIRC 76.1x3	S 355	2.244	-44.99998	L=1.000*_tubos
55	29	45	CIRC 76.1x3	S 355	2.244	-134.99994	L=1.000*_tubos
56	44	39	CIRC 76.1x3	S 355	2.244	-134.99994	L=1.000*_tubos
57	23	22	CAEP 50x4	S 355	1.433	-44.99998	L=1.000*_tubos
59	46	42	CIRC 76.1x3	S 355	2.244	-44.99998	L=1.000*_tubos
60	40	36	CIRC 76.1x3	S 355	2.244	-44.99998	L=1.000*_tubos
62	18	2	CIRC 88.9x3	S 355	1.465	0.00023	L=0.8*_tubos
65	36	37	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*_tubos
66	37	32	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*_tubos
67	32	36	CIRC 48.3x3	S 355	1.7	-134.99994	L=0.9*_tubos
68	2	3	CIRC 88.9x3	S 355	1.465	0.00023	L=0.8*_tubos
69	3	15	CIRC 88.9x3	S 355	1.465	0.00023	L=0.8*_tubos
70	32	41	CIRC 133x4	S 355	1.465	0.00023	L=0.8*_tubos
71	20	26	CIRC 48.3x3	S 355	1.853	-134.99994	L=0.9*_tubos
72	26	1	CIRC 48.3x3	S 355	1.853	-134.99994	L=0.9*_tubos
73	1	20	CIRC 48.3x3	S 355	1.853	-134.99994	L=0.9*_tubos
74	21	27	CIRC 48.3x3	S 355	1.777	-134.99994	L=0.9*_tubos
75	27	19	CIRC 48.3x3	S 355	1.777	-134.99994	L=0.9*_tubos
76	19	21	CIRC 48.3x3	S 355	1.777	-134.99994	L=0.9*_tubos
77	36	27	CIRC 76.1x3	S 355	2.614	-134.99994	L=1.000*_tubos
78	19	26	CIRC 76.1x3	S 355	2.666	-44.99998	L=1.000*_tubos
79	20	67	CIRC 76.1x3	S 355	2.719	-134.99994	L=1.000*_tubos
80	41	44	CIRC 133x4	S 355	1.465	0.00023	L=0.8*_tubos
81	37	19	CIRC 76.1x3	S 355	2.614	-134.99994	L=1.000*_tubos
82	21	1	CIRC 76.1x3	S 355	2.666	-44.99998	L=1.000*_tubos
83	26	62	CIRC 76.1x3	S 355	2.719	-134.99994	L=1.000*_tubos
84	44	47	CIRC 133x4	S 355	1.465	0.00023	L=0.8*_tubos
85	32	21	CIRC 76.1x3	S 355	2.614	-134.99994	L=1.000*_tubos
86	1	66	CIRC 76.1x3	S 355	2.719	-134.99994	L=1.000*_tubos
87	25	24	CAEP 50x4	S 355	1.433	-44.99998	L=1.000*_tubos
89	27	20	CIRC 76.1x3	S 355	2.666	-44.99998	L=1.000*_tubos
90	47	29	CIRC 133x4	S 355	1.465	0.00023	L=0.8*_tubos
92	36	39	CIRC 133x4	S 355	1.465	0	L=0.8*_tubos
95	66	67	CIRC 48.3x3	S 355	1.93	-134.99994	L=0.9*_tubos
96	67	62	CIRC 48.3x3	S 355	1.93	-134.99994	L=0.9*_tubos
97	62	66	CIRC 48.3x3	S 355	1.93	-134.99994	L=0.9*_tubos
98	38	49	CIRC 48.3x3	S 355	2.083	-134.99994	L=0.9*_tubos
99	49	28	CIRC 48.3x3	S 355	2.083	-134.99994	L=0.9*_tubos
100	28	38	CIRC 48.3x3	S 355	2.083	-134.99994	L=0.9*_tubos

101	48	50	CIRC 48.3x3	S 355	2.006	-134.99994	L=0.9*I_tubos
102	50	33	CIRC 48.3x3	S 355	2.006	-134.99994	L=0.9*I_tubos
103	33	48	CIRC 48.3x3	S 355	2.006	-134.99994	L=0.9*I_tubos
104	39	42	CIRC 133x4	S 355	1.465	0	L=0.8*I_tubos
105	42	45	CIRC 133x4	S 355	1.465	0	L=0.8*I_tubos
106	45	30	CIRC 133x4	S 355	1.465	0	L=0.8*I_tubos
107	37	40	CIRC 133x4	S 355	1.465	0	L=0.8*I_tubos
108	62	50	CIRC 88.9x3	S 355	2.772	-44.99998	L=1.000*I_tubos
109	48	49	CIRC 88.9x3	S 355	2.827	-134.99994	L=1.000*I_tubos
110	28	97	CIRC 88.9x3	S 355	2.883	-44.99998	L=1.000*I_tubos
111	40	43	CIRC 133x4	S 355	1.465	0	L=0.8*I_tubos
112	66	33	CIRC 88.9x3	S 355	2.772	-44.99998	L=1.000*I_tubos
113	50	28	CIRC 88.9x3	S 355	2.827	-134.99994	L=1.000*I_tubos
114	38	92	CIRC 88.9x3	S 355	2.883	-44.99998	L=1.000*I_tubos
115	43	46	CIRC 133x4	S 355	1.465	0	L=0.8*I_tubos
116	33	38	CIRC 88.9x3	S 355	2.827	-134.99994	L=1.000*I_tubos
117	109	110	CAEP 50x4	S 355	1.586	-44.99998	L=1.000*I_tubos
118	46	31	CIRC 133x4	S 355	1.465	0	L=0.8*I_tubos
119	67	48	CIRC 88.9x3	S 355	2.772	-44.99998	L=1.000*I_tubos
120	49	96	CIRC 88.9x3	S 355	2.883	-44.99998	L=1.000*I_tubos
122	30	4	CIRC 88.9x3	S 355	1.465	0	L=0.8*I_tubos
125	96	97	CIRC 48.3x3	S 355	2.159	-134.99994	L=0.9*I_tubos
126	97	92	CIRC 48.3x3	S 355	2.159	-134.99994	L=0.9*I_tubos
127	92	96	CIRC 48.3x3	S 355	2.159	-134.99994	L=0.9*I_tubos
128	4	5	CIRC 88.9x3	S 355	1.465	0	L=0.8*I_tubos
129	5	6	CIRC 88.9x3	S 355	1.465	0	L=0.8*I_tubos
130	6	14	CIRC 88.9x3	S 355	1.465	0	L=0.8*I_tubos
131	53	55	CIRC 48.3x3	S 355	2.312	-134.99994	L=0.9*I_tubos
132	55	51	CIRC 48.3x3	S 355	2.312	-134.99994	L=0.9*I_tubos
133	51	53	CIRC 48.3x3	S 355	2.312	-134.99994	L=0.9*I_tubos
134	54	56	CIRC 48.3x3	S 355	2.236	-134.99994	L=0.9*I_tubos
135	56	52	CIRC 48.3x3	S 355	2.236	-134.99994	L=0.9*I_tubos
136	52	54	CIRC 48.3x3	S 355	2.236	-134.99994	L=0.9*I_tubos
137	96	56	CIRC 88.9x3	S 355	2.94	-134.99994	L=1.000*I_tubos
138	52	55	CIRC 88.9x3	S 355	2.997	-44.99998	L=1.000*I_tubos
139	53	127	CIRC 88.9x3	S 355	3.056	-134.99994	L=1.000*I_tubos
140	31	7	CIRC 88.9x3	S 355	1.465	0	L=0.8*I_tubos
141	97	52	CIRC 88.9x3	S 355	2.94	-134.99994	L=1.000*I_tubos
142	54	51	CIRC 88.9x3	S 355	2.997	-44.99998	L=1.000*I_tubos
143	55	122	CIRC 88.9x3	S 355	3.056	-134.99994	L=1.000*I_tubos
144	7	8	CIRC 88.9x3	S 355	1.465	0	L=0.8*I_tubos
145	92	54	CIRC 88.9x3	S 355	2.94	-134.99994	L=1.000*I_tubos
146	51	126	CIRC 88.9x3	S 355	3.056	-134.99994	L=1.000*I_tubos
147	139	140	CAEP 60x4	S 355	1.739	-44.99998	L=1.000*I_tubos
148	8	9	CIRC 88.9x3	S 355	1.465	0	L=0.8*I_tubos
149	56	53	CIRC 88.9x3	S 355	2.997	-44.99998	L=1.000*I_tubos
150	9	16	CIRC 88.9x3	S 355	1.465	0	L=0.8*I_tubos
152	67	26	CIRC 177.8x5	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
155	126	127	CIRC 48.3x3	S 355	2.389	-134.99994	L=0.9*I_tubos
156	127	122	CIRC 48.3x3	S 355	2.389	-134.99994	L=0.9*I_tubos
157	122	126	CIRC 48.3x3	S 355	2.389	-134.99994	L=0.9*I_tubos
158	229	232	CIRC 48.3x3	S 355	2.542	-134.99994	L=0.9*I_tubos
159	232	226	CIRC 48.3x3	S 355	2.542	-134.99994	L=0.9*I_tubos
160	226	229	CIRC 48.3x3	S 355	2.542	-134.99994	L=0.9*I_tubos

161	230	233	CIRC 48.3x3	S 355	2.465	-134.99994	L=0.9*I_tubos
162	233	227	CIRC 48.3x3	S 355	2.465	-134.99994	L=0.9*I_tubos
163	227	230	CIRC 48.3x3	S 355	2.465	-134.99994	L=0.9*I_tubos
164	26	27	CIRC 177.8x5	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
165	27	37	CIRC 177.8x5	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
166	92	28	CIRC 193.7x6	S 355	1.953	0.00023	L=0.8*I_tubos
167	28	33	CIRC 193.7x6	S 355	1.953	0.00023	L=0.8*I_tubos
168	122	233	CIRC 88.9x3	S 355	3.115	-44.99998	L=1.000*I_tubos
169	230	232	CIRC 88.9x3	S 355	3.175	-134.99994	L=1.000*I_tubos
170	226	284	CIRC 88.9x3	S 355	3.236	-44.99998	L=1.000*I_tubos
171	33	62	CIRC 193.7x6	S 355	1.953	0.00023	L=0.8*I_tubos
172	126	227	CIRC 88.9x3	S 355	3.115	-44.99998	L=1.000*I_tubos
173	233	226	CIRC 88.9x3	S 355	3.175	-134.99994	L=1.000*I_tubos
174	229	152	CIRC 88.9x3	S 355	3.236	-44.99998	L=1.000*I_tubos
175	96	38	CIRC 193.7x6	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
176	227	229	CIRC 88.9x3	S 355	3.175	-134.99994	L=1.000*I_tubos
177	169	170	CAEP 60x4	S 355	1.892	-44.99998	L=1.000*I_tubos
178	38	48	CIRC 193.7x6	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
179	127	230	CIRC 88.9x3	S 355	3.115	-44.99998	L=1.000*I_tubos
180	232	282	CIRC 88.9x3	S 355	3.236	-44.99998	L=1.000*I_tubos
181	48	66	CIRC 193.7x6	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
182	97	49	CIRC 193.7x6	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
183	49	50	CIRC 193.7x6	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
184	50	67	CIRC 193.7x6	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
185	282	284	CIRC 48.3x3	S 355	2.618	-134.99994	L=0.9*I_tubos
186	284	152	CIRC 48.3x3	S 355	2.618	-134.99994	L=0.9*I_tubos
187	152	282	CIRC 48.3x3	S 355	2.618	-134.99994	L=0.9*I_tubos
188	122	51	CIRC 193.7x8	S 355	1.953	0.00023	L=0.8*I_tubos
189	51	52	CIRC 193.7x8	S 355	1.953	0.00023	L=0.8*I_tubos
190	52	92	CIRC 193.7x8	S 355	1.953	0.00023	L=0.8*I_tubos
191	126	53	CIRC 193.7x8	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
192	53	54	CIRC 193.7x8	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
193	54	96	CIRC 193.7x8	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
194	127	55	CIRC 193.7x8	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
195	55	56	CIRC 193.7x8	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
196	56	97	CIRC 193.7x8	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
197	152	226	CIRC 193.7x10	S 355	1.953	0.00023	L=0.8*I_tubos
198	226	227	CIRC 193.7x10	S 355	1.953	0.00023	L=0.8*I_tubos
199	227	122	CIRC 193.7x10	S 355	1.953	0.00023	L=0.8*I_tubos
200	282	229	CIRC 193.7x10	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
201	229	230	CIRC 193.7x10	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
202	230	126	CIRC 193.7x10	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
203	284	232	CIRC 193.7x10	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
204	232	233	CIRC 193.7x10	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
205	233	127	CIRC 193.7x10	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
206	248	257	CIRC 219.1x10	S 355	1.953	0.00023	L=0.8*I_tubos
207	257	258	CIRC 219.1x10	S 355	1.953	0.00023	L=0.8*I_tubos
208	258	152	CIRC 219.1x10	S 355	1.953	0.00023	L=0.8*I_tubos
209	249	259	CIRC 244.5x10	S 355	1.953	0.00023	L=0.8*I_tubos
210	259	260	CIRC 244.5x10	S 355	1.953	0.00023	L=0.8*I_tubos

Simulação do efeito da corrosão na verificação da segurança estrutural de uma torre metálica degradada

211	260	248	CIRC 244.5x10	S 355	1.953	0.00023	L=0.8*I_tubos
212	251	263	CIRC 219.1x10	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
213	263	264	CIRC 219.1x10	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
214	264	282	CIRC 219.1x10	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
215	252	265	CIRC 244.5x10	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
216	265	266	CIRC 244.5x10	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
217	266	251	CIRC 244.5x10	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
218	254	269	CIRC 219.1x10	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
219	269	270	CIRC 219.1x10	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
220	270	284	CIRC 219.1x10	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
221	255	271	CIRC 244.5x10	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
222	271	272	CIRC 244.5x10	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
223	272	254	CIRC 244.5x10	S 355	1.953	0	L=0.8*I_tubos
246	12	249	CIRC 244.5x12	S 355	3.13	0.00023	L=0.8*I_tubos
249	13	252	CIRC 244.5x12	S 355	3.13	0	L=0.8*I_tubos
252	17	255	CIRC 244.5x12	S 355	3.13	0	L=0.8*I_tubos
256	263	269	CIRC 48.3x3	S 355	2.771	-134.99994	L=0.9*I_tubos
257	269	257	CIRC 48.3x3	S 355	2.771	-134.99994	L=0.9*I_tubos
258	257	263	CIRC 48.3x3	S 355	2.771	-134.99994	L=0.9*I_tubos
259	264	270	CIRC 48.3x3	S 355	2.695	-134.99994	L=0.9*I_tubos
260	270	258	CIRC 48.3x3	S 355	2.695	-134.99994	L=0.9*I_tubos
261	258	264	CIRC 48.3x3	S 355	2.695	-134.99994	L=0.9*I_tubos
262	282	270	CIRC 101.6x3	S 355	3.297	-134.99994	L=1.000*I_tubos
263	258	269	CIRC 101.6x3	S 355	3.359	-44.99998	L=1.000*I_tubos
264	263	254	CIRC 101.6x3	S 355	3.422	-134.99994	L=1.000*I_tubos
266	284	258	CIRC 101.6x3	S 355	3.297	-134.99994	L=1.000*I_tubos
267	264	257	CIRC 101.6x3	S 355	3.359	-44.99998	L=1.000*I_tubos
268	269	248	CIRC 101.6x3	S 355	3.422	-134.99994	L=1.000*I_tubos
270	152	264	CIRC 101.6x3	S 355	3.297	-134.99994	L=1.000*I_tubos
271	257	251	CIRC 101.6x3	S 355	3.422	-134.99994	L=1.000*I_tubos
272	270	263	CIRC 101.6x3	S 355	3.359	-44.99998	L=1.000*I_tubos
274	251	254	CIRC 48.3x3	S 355	2.848	-134.99994	L=0.9*I_tubos
275	254	248	CIRC 48.3x3	S 355	2.848	-134.99994	L=0.9*I_tubos
276	248	251	CIRC 48.3x3	S 355	2.848	-134.99994	L=0.9*I_tubos
279	265	271	CIRC 48.3x3	S 355	3.001	-134.99994	L=0.9*I_tubos
280	271	259	CIRC 48.3x3	S 355	3.001	-134.99994	L=0.9*I_tubos
281	259	265	CIRC 48.3x3	S 355	3.001	-134.99994	L=0.9*I_tubos
282	266	272	CIRC 48.3x3	S 355	2.924	-134.99994	L=0.9*I_tubos
283	272	260	CIRC 48.3x3	S 355	2.924	-134.99994	L=0.9*I_tubos
284	260	266	CIRC 48.3x3	S 355	2.924	-134.99994	L=0.9*I_tubos
289	248	272	CIRC 101.6x3	S 355	3.485	-44.99998	L=1.000*I_tubos
290	266	271	CIRC 101.6x3	S 355	3.548	-134.99994	L=1.000*I_tubos
291	259	255	CIRC 101.6x3	S 355	3.613	-44.99998	L=1.000*I_tubos
293	251	260	CIRC 101.6x3	S 355	3.485	-44.99998	L=1.000*I_tubos
294	272	259	CIRC 101.6x3	S 355	3.548	-134.99994	L=1.000*I_tubos
295	265	249	CIRC 101.6x3	S 355	3.613	-44.99998	L=1.000*I_tubos
297	260	265	CIRC 101.6x3	S 355	3.548	-134.99994	L=1.000*I_tubos
298	254	266	CIRC 101.6x3	S 355	3.485	-44.99998	L=1.000*I_tubos
299	271	252	CIRC 101.6x3	S 355	3.613	-44.99998	L=1.000*I_tubos
300	252	255	CIRC 60.3x3	S 355	3.077	-134.99994	L=0.9*I_tubos
301	255	249	CIRC 60.3x3	S 355	3.077	-134.99994	L=0.9*I_tubos
302	249	252	CIRC 60.3x3	S 355	3.077	-134.99994	L=0.9*I_tubos
306	252	17	CIRC 114.3x4	S 355	4.432	-134.99994	L=1.000*I_tubos
308	255	12	CIRC 114.3x4	S 355	4.432	-134.99994	L=1.000*I_tubos
310	249	13	CIRC 114.3x4	S 355	4.432	-134.99994	L=1.000*I_tubos
312	305	306	CAEP 60x4	S 355	2.045	-44.99998	L=1.000*I_tubos
314	309	310	CAEP 60x4	S 355	2.199	-44.99998	L=1.000*I_tubos
316	313	314	CAEP 60x4	S 355	2.352	-44.99998	L=1.000*I_tubos